

Thomas Tröger

Untersuchung der Eigenschaften von tieffrequenten Geräuschemissionen  
bei Blockheizkraftwerken (BHKWs) zur Formulierung spezifischer  
Nebenbestimmungen des tieffrequenten Lärmschutzes im baurechtlichen und  
immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren

eingereicht als

DIPLOMARBEIT

an der

HOCHSCHULE MITTWEIDA (FH)

---

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fachbereich Mathematik, Physik, Informatik

Chemnitz, 2009

Erstprüfer: Herr Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt

Zweitprüfer: Herr Dr.-Ing. Rainer Kubicek

vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am:

**Bibliografische Beschreibung:**

Tröger, Thomas:

Untersuchung der Eigenschaften von tieffrequenten Geräuschemissionen bei Blockheizkraftwerken (BHKWs) zur Formulierung spezifischer Nebenbestimmungen des tieffrequenten Lärmschutzes im baurechtlichen und immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren.

- 2009. – 83 S. Mittweida, Hochschule Mittweida (FH), Fachbereich Mathematik, Physik, Informatik, Diplomarbeit, 2009

**Referat:**

Ziel der Diplomarbeit ist es, durch messtechnische Untersuchungen im Nahbereich der verschiedenen Teilschallquellen von Blockheizkraftwerken (BHKWs), Aussagen über jeweilige tieffrequente Geräuschemissionen zu treffen. Um die tieffrequenten Geräuschemissionen zu minimieren sollen Vorschläge für den zu realisierenden technischen Schallschutz an diesen Quellen getroffen werden. Auf Grundlage dieser Vorschläge sollen dann spezifische Nebenbestimmungen des tieffrequenten Lärmschutzes für das bau- und immissionsschutzrechtliche Genehmigungsverfahren für BHKWs abgeleitet werden. Weiterhin sollen aus den Ergebnissen der durchgeführten Messungen geeignete Messverfahren erarbeitet werden, um die von den Genehmigungsbehörden geforderten Inbetriebnahmемessungen an BHKWs korrekt durchzuführen.

## **Vorwort**

Die Diplomarbeit wurde im Rahmen meines Diplomsemesters an der Hochschule Mittweida (FH) University of Applied Sciences in Zusammenarbeit mit dem Landratsamt Erzgebirgskreis (Außenstelle Aue), Sachgebiet Immissionsschutz, verfasst.

An dieser Stelle möchte ich mich deshalb bei allen bedanken, die mich während des Diplomsemesters fachlich bzw. persönlich unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Rainer Kubicek, der mich über den gesamten Zeitraum sehr gut betreut hat. Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Lothar Förster für die bereit gestellte Messtechnik und Messpersonal sowie für die hilfreichen praktischen und fachlichen Hinweise bedanken. In diesem Zusammenhang gilt mein Dank auch an Andreas Förster, der mir im praktischen Teil tatkräftig zur Seite stand. Mein Dank gilt auch Frau Wende, für die vielen guten Ratschläge.

Auch bei Herrn Prof. Dr. Ing. Jörn Hübelt und Herrn Dr. rer. nat. Detlef Schulz möchte ich mich für die sehr gute theoretische sowie praktische Ausbildung während meines Studiums an der Hochschule Mittweida bedanken.

Spezieller Dank gilt auch den Betreibern der Biogasanlagen, Herrn Leistner, Herrn Furkert, Herrn Forchheim sowie Herrn Martin und Herrn Schultz für die Erlaubnis der Messungen an den Blockheizkraftwerken.

Zuletzt möchte ich mich bei meiner Freundin für das Korrekturlesen der Diplomarbeit und Unterstützung während der letzten Monate sowie meinen Eltern, die mir immer helfend zur Seite standen, bedanken.

## **Inhaltsverzeichnis**

Abkürzungsverzeichnis und verwendete Symbole .....	I
Abbildungsverzeichnis .....	III
Tabellenverzeichnis .....	V
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation und Zielstellung der Diplomarbeit .....	1
1.2 Aufbau und Funktion eines Blockheizkraftwerks.....	5
1.3 Schallentstehung an Blockheizkraftwerken .....	7
<b>2 Tieffrequenter Schall.....</b>	<b>11</b>
2.1 Definition und Schallquellen .....	11
2.2 Besonderheiten des tieffrequenten Schalls .....	14
2.3 A-Bewertungskurve und Schlussfolgerungen bezüglich der Beurteilung des tieffrequenten Schalls .....	15
2.4 Beurteilung nach DIN 45680.....	18
<b>3 Theoretische Betrachtungen.....</b>	<b>21</b>
3.1 Emissionen durch Verbrennungsmotoren.....	22
3.2 Schallleitung in Rohren und Schalldämpfer .....	27
3.2.1 Schallausbreitung in Rohren .....	27
3.2.2 Schalldämpfer .....	28
3.2.2.1 Absorptionsschalldämpfer .....	30
3.2.2.2 Resonanzschalldämpfer.....	32
3.3 Schallabstrahlung des Abgaskamins .....	33
3.4 Tieffrequente Schallausbreitung im Freien .....	38
3.5 Schalleintrag tiefer Frequenzen in Gebäude .....	43
<b>4 Durchführung der Messungen .....</b>	<b>45</b>
4.1 Erarbeitung und Erläuterung des Messverfahrens.....	45
4.2 Messtechnik und Messparameter .....	47
4.3 Langenberg .....	48
4.3.1 Beschreibung der Anlage .....	48
4.3.2 Auswertung der Messwerte .....	49



4.4	Oberbobritzsch .....	54
4.4.1	Beschreibung der Anlage .....	54
4.4.2	Auswertung der Messwerte .....	55
4.5	Lichtenberg .....	60
4.5.1	Beschreibung der Anlage .....	60
4.5.2	Auswertung der Messwerte .....	61
4.6	Reinhardtsdorf .....	66
4.6.1	Beschreibung der Anlage .....	66
4.6.2	Auswertung der Messwerte .....	67
4.7	Tieffrequente Schallausbreitung in Wohnräumen .....	69
<b>5</b>	<b>Interpretation und Schlussfolgerungen aus den Messergebnissen ..</b>	<b>72</b>
<b>6</b>	<b>Möglichkeiten des technischen Schallschutzes zur Emissionsbegrenzung .....</b>	<b>73</b>
<b>7</b>	<b>Formulierung spezifischer Nebenbestimmungen zum tieffrequenten Lärmschutz .....</b>	<b>75</b>
<b>8</b>	<b>Anleitung zur Durchführung von Inbetriebnahmemessungen .....</b>	<b>80</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>83</b>
	Literaturverzeichnis .....	VI
	Anlagenverzeichnis .....	VIII
	Eidesstattliche Erklärung .....	XI

**Abkürzungsverzeichnis und verwendete Symbole**

<b>Kurzzeichen</b>	<b>Bedeutung</b>
°	Grad
Abb.	Abbildung
AHWs	Anhaltswerte
BHKW / BHKWs	Blockheizkraftwerk / Blockheizkraftwerke
bzw.	beziehungsweise
c	Schallgeschwindigkeit im Medium Luft (342 m/s)
dB	Dezibel
DIN	Deutsches Institut für Normung
d.h.	das heißt
e.G.	eingetragene Genossenschaft
EN	Europanorm
f	Frequenz
ggf.	gegebenenfalls
h	Höhe
$h_E$	Höhe des Empfängers
$h_Q$	Höhe der Quelle
Hz	Hertz
IRW / IRWs	Immissionsrichtwert / Immissionsrichtwertes
ISO	Internationale Organisation für Normung
kW	Kilowatt
$\Delta L$	Schalldruckpegeldifferenz
$\lambda$	Wellenlänge
$L_{eq}$	energieäquivalenter unbewerteter Schalldruckpegel
$L_{Aeq}$	energieäquivalenter A-bewerteter Schalldruckpegel
$L_{Ceq}$	energieäquivalenter C-bewerteter Schalldruckpegel
$L_{LIN}$	linearer (unbewerteter) Schalldruckpegel
$L_{Terz,eq}$	äquivalenter Dauerschallpegel einer Terz
$L_w$	linearer (unbewerteter) Schallleistungspegel

$L_{wA}$	A-bewerteter Schallleistungspegel
$L_{w, Terz}$	Terz-Schallleistungspegel
$K_o$	Raumwinkelmaß
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
Kap	Kapitel
m	Meter
MP	Messpunkt
MS	Messstrahl
MW	Megawatt
$\eta$	Wirkungsgrad
o.g.	oben genannt
p	Schalldruck
$p_0$	Bezugsschalldruck ( $2 \cdot 10^{-5}$ Pa)
$p_e$	Druck der einfallenden Schallwelle
P	Schallleistung
$P_0$	Bezugsschallleistung ( $10^{-12}$ W)
$P_{el}$	elektrische Leistung
$p_r$	Druck der reflektierten Schallwelle
$P_{th}$	thermische Leistung
s	Abstand zwischen Schallquelle und Empfänger
$s_0$	Bezugsabstand (1m)
SD	Schalldämpfer
SSK	Schallschutzklasse
sog.	so genannter
TA	technische Anleitung
u.a.	unter anderem
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
z.B.	zum Beispiel

<b><u>Abbildungsverzeichnis</u></b>	<b>Seite</b>
Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Blockheizkraftwerkes /25/.....	5
Abbildung 2: Schallquellen an einem Blockheizkraftwerk (in Containerbauweise).....	7
Abbildung 3: Übersicht der verschiedenen tieffrequenten Schallarten /4/ .....	11
Abbildung 4: Hörschwelle und Kurven gleicher Lautstärke /20/ .....	14
Abbildung 5: A-Bewertungskurve in Abhängigkeit von der Frequenz.....	15
Abbildung 6: Pegelverteilung im rechteckigen Raum (5 * 4 * 3 m) für f = 55 Hz /22/ .....	18
Abbildung 7: Vergleich der Spektren Innenraumpegel-Abgaskamin .....	23
Abbildung 8: Asynchrone Zusammenführung der Abgasrohre an einem 4-Zylinder-4-Takt Reihenmotor /5/ .....	25
Abbildung 9: Schematische Darstellung der Schalldämpferwirkung /9/ .....	28
Abbildung 10: Dämpfungsspektrum eines Absorptionsschalldämpfers /15/ .....	30
Abbildung 11: Schematische Darstellung zur Ausbreitung von Abgasgeräuschen einer Heizungsanlage /7/, /21/ .....	31
Abbildung 12: Dreikammer-Tiefton-Schalldämpfer /16/.....	32
Abbildung 13: Schematischer Aufbau eines Dreikammer-Tiefton- Schalldämpfers /16/ .....	32
Abbildung 14: Richtwirkung DI der Schallabstrahlung einer Schornstein- mündung bei einer Nennweite von 340 mm /7/, /21/.....	34
Abbildung 15: Beugung hoher Frequenzen und tiefer Frequenzen /10/.....	34
Abbildung 16: Kugelwellenausbreitung an der Abgasöffnung eines BHKWs, für tiefe Frequenzen .....	35
Abbildung 17: Reflexion von Schallwellen am Boden /1/ .....	38
Abbildung 18: Schallausbreitung einer Punktquelle mit Wandreflexion (Wand in 1 m Abstand) /1/ .....	40
Abbildung 19: Messwerte ermittelt entlang 4 MS in 1,5 m Höhe /1/ .....	41
Abbildung 20: Messwerte ermittelt entlang eines MS in 1,5 & 4 m Höhe /1/ .....	41
Abbildung 21: Schallenergiebilanz an einer Wand (Fenster) /5/.....	43
Abbildung 22: Übersichtsbild BHKW Langenberg, Maßstab ca. 1:7.000 /17/ ..	48

Abbildung 23: Messung Langenberg, 1 m, 80 Hz .....	49
Abbildung 24: Messung Langenberg, 4 m, 80 Hz .....	50
Abbildung 25: Messung Langenberg, MS1, 3 Messhöhen, 80 Hz.....	51
Abbildung 26: Messung Langenberg, 12 m, 80 Hz .....	52
Abbildung 27: Messung Langenberg, 12 m, Bereich 0 bis 5 m, 80 Hz.....	53
Abbildung 28: Übersichtsbild BHKW Oberbobritzsch, Maßstab ca. 1:7.000 /17/ .....	54
Abbildung 29: Messung Oberbobritzsch, 5,5 m, Bereich 0 bis 25 m, 80 Hz.....	55
Abbildung 30: Messung Oberbobritzsch, 5,5 m, Bereich 0 bis 5 m, 80 Hz.....	56
Abbildung 31: Messung Oberbobritzsch, 5,5 m, Bereich 0 bis 25 m, 40 Hz.....	58
Abbildung 32: Messung Oberbobritzsch, 5,5 m, Bereich 0 bis 5 m, 40 Hz.....	59
Abbildung 33: Übersichtsbild BHKW Lichtenberg, Maßstab ca. 1:7.000 /17/ ...	60
Abbildung 34: Messung Lichtenberg, 2,1 / 8 m, Bereich 0 bis 18 m, 80 Hz .....	62
Abbildung 35: Messung Lichtenberg, 2,1 / 8 m, Bereich 0 bis 5 m, 80 Hz .....	63
Abbildung 36: Messung Lichtenberg, 2,1 / 8 m, Bereich 0 bis 18 m, 40 Hz .....	64
Abbildung 37: Messung Lichtenberg, 2,1 / 8 m, Bereich 0 bis 5 m, 40 Hz .....	65
Abbildung 38: Übersichtsbild BHKW Reinhardtsdorf, Maßstab ca. 1 : 7.000 /17/ .....	66
Abbildung 39: Messung Reinhardtsdorf, 3,5 / 10,1 m, Bereich 0 bis 5 m, 80 Hz.....	67
Abbildung 40: Messung Reinhardtsdorf, 3,5 / 10,1 m, Bereich 0 bis 5 m, 40 Hz.....	68
Abbildung 41: Schematische Darstellung des Messaufbaus .....	70
Abbildung 42: Pegeldifferenz außen/innen mit Trendkurve.....	71
Abbildung 43: Messbeispiel BHKW, Maßstab 1 :21 000 .....	75

**Tabellenverzeichnis****Seite**

<u>Tabelle 1:</u> Anhaltswerte bei deutlich hervortretenden Einzeltönen aus [GL 2.2] .....	20
<u>Tabelle 2:</u> Anhaltswerte in sonstigen Fällen aus [GL 2.3] .....	20
<u>Tabelle 3:</u> Übersicht über den Zusammenhang – Anzahl Motorzylinder zur dominierend erzeugten Frequenz bei $n = 1500$ 1/min .....	25
<u>Tabelle 4:</u> Vergleich des Schallspektrums der Abgasmündung des Motors mit der in der Schallprognose geforderten, maximal zulässigen Oktav-Schallleistungspegel der Kaminmündung und der resultierenden Anforderung an den Schalldämpfer .....	74
<u>Tabelle 5:</u> Beispiel für die in den Nebenbestimmungen anzugebende Tabelle der maximal zulässigen Terz-Schallleistungspegel des Abgaskamins in den für BHKWs relevanten Terzmittenfrequenzen.....	79

## **1 Einleitung**

Diese Diplomarbeit soll sich mit der tieffrequenten Schallabstrahlung im Nahbereich von Blockheizkraftwerken beschäftigen. Die Notwendigkeit dieser Untersuchungen wird mit den Ausführungen im Punkt 1.1 verdeutlicht. Anschließend wird der Aufbau und die Funktionsweise von BHKWs umrissen. Es folgen detailliertere Beschreibungen zur Schallentstehung an Blockheizkraftwerken im Punkt 1.3.

### **1.1 Motivation und Zielstellung der Diplomarbeit**

Aufgrund der staatlichen Förderung bei der Errichtung von Elektroenergie-Gewinnungsanlagen mit erneuerbaren Energien werden bereits seit einigen Jahren in erheblichem Umfang Blockheizkraftwerke errichtet, die je nach Höhe der erzeugten Feuerungswärmeleistung (kleiner oder größer als 1 MW) baurechtlich oder immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftig sind. Die Errichtung solcher BHKWs wird sowohl in Heizkraftwerken von Energieerzeuger-Unternehmen als auch in sogenannten Biogasanlagen von insbesondere landwirtschaftlichen Unternehmen realisiert.

Durch die Konstruktion und Betriebsweise dieser BHKWs und der damit technisch bedingten Geräuschemission und möglichen freien Schallausbreitung in die Wohnnachbarschaft sind diese Anlagen in besonderem Maße geeignet, schädliche Umwelteinwirkungen in Form erheblicher Belästigungen durch Geräusche zu erzeugen. Damit ist die Festsetzung von Schallschutzforderungen im baurechtlichen bzw. immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren zwingend erforderlich.

Die Auswertung von Bevölkerungsbeschwerden über „Lärm durch Anlagen“ zeigt, dass derzeit von einer ganzen Reihe neu errichteter und erst seit kurzer Zeit in Betrieb gegangener BHKWs (insbesondere von Biogasanlagen) Lärmbelästigungsprobleme im Einwirkungsbereich dieser Anlagen auftreten, obwohl diese Vorhaben in der Genehmigungsphase aus der Sicht des Immissionsschutzes geprüft und Nebenbestimmungen zum Lärmschutz der Nachbarschaft in den Baugenehmigungen bzw. immissionsschutzrechtlichen

Genehmigungsbescheiden formuliert wurden. Die Überprüfung dieser Lärmbeschwerdefälle durch die zuständigen Immissionsschutz-Überwachungsbehörden führt dabei zu dem Ergebnis, dass die Lärmbeschwerden der betroffenen Anwohner objektiv berechtigt sind.

Diese aufgezeigte Diskrepanz hat folgende Ursachen:

Die messtechnische Erhebung der von diesen BHKWs ausgehenden Geräuschemission und deren Analyse führt in nahezu allen Fällen zu dem Ergebnis, dass die sich in der betroffenen Wohnnachbarschaft einstellende lärmverursachende Geräuschemission tieffrequent ist - im Sinne der Nummer 7.3. der TA Lärm /13/, in Verbindung mit der DIN 45680 /11/. Als Konsequenz ergibt sich eine weitergehende Prüfung dieser Anlagen. Eine alleinige Regelfallprüfung, für gewöhnliche Anlagengeräuschquellen nach Nummer 6 der TA Lärm /13/ ist in diesem Fall nicht ausreichend.

Von den BHKWs werden tonale tieffrequente Geräuschemissionen mit hoher Energie emittiert, die je nach Anzahl der Motorzylinder des Verbrennungsmotors im Terzfrequenzbereich von  $40 \text{ Hz} < f < 100 \text{ Hz}$  liegen und damit dem Terzfrequenz-Gültigkeitsbereich 8 Hz bis 100 Hz der DIN 45680 /11/ unterliegen. Diese tieffrequenten Geräuschemissionen überschreiten zwar nicht die nach Nummer 6.1. der TA Lärm gültigen Lärm-Immissionsrichtwerte an den maßgeblichen Immissionsnachweisorten, führen aber aufgrund der spezifischen Störwirkung des tieffrequenten Schalls zu erheblichen Lärmbelastungen in der betroffenen Wohnnachbarschaft.

Da die Schalldruckpegel tieffrequenter Schallenergien durch die international anzuwendende Frequenzbewertungskurve A sehr stark gedämpft werden, erzeugen sie nur sehr niedrige dB(A)-Pegel, die in der Regel die gesetzlich festgelegten Immissionsrichtwerte der TA Lärm einhalten oder sogar unterschreiten. Dadurch entsteht die Situation einer scheinbar „zulässigen“ Geräusch-Immissionssituation, obwohl erhebliche Belästigungen für die Wohnnachbarschaft insbesondere nachts, wenn der Grundgeräuschpegel der Umgebung niedrig ist, auftreten können. Ursache hierfür ist neben der



besonderen Lästigkeit tieffrequenter Schallenergien deren Fähigkeit, geschlossene Wohnungsfenster nahezu ungedämpft zu durchdringen.

Die aktuelle Fassung der TA Lärm trägt diesem Sachverhalt dadurch Rechnung, indem sie unter Nummer 7.3. in Verbindung mit Anlage A.1.5. die Berücksichtigung tieffrequenter Geräusche zusätzlich zur Lärmbeurteilung mittels dB(A)-Pegel-Immissionsrichtwerten immer dann vorschreibt, wenn die Differenz zwischen dem gemessenen C-bewerteten und dem A-bewerteten Schalldruckpegel in schutzbedürftigen Räumen bei geschlossenen Fenstern mehr als 20 dB beträgt. Ist diese Bedingung erfüllt, so dominieren in den vor Lärm zu schützenden Gebäuden die tieffrequenten Schallenergieanteile. Diese Bedingung wird oft bei den hier zu betrachtenden BHKWs erfüllt. /2/

Die von den BHKWs emittierten tieffrequenten Schallwellen breiten sich aufgrund ihres langwelligen Charakters auch in größere Entfernungen von der BHKW-Geräuschquelle aus, wo maßgebliche mittelfrequente Geräuschemissionen von dieser Geräuschquelle - und damit Lärmprobleme durch Normalschall - nicht mehr zu erwarten sind /1/.

In den von den Bau- bzw. Immissionsschutz-Genehmigungsbehörden für Neugenehmigungen geforderten Schallimmissionsprognosen von Akustik-Ingenieurbüros wird zwar der Nachweis der Einhaltung der gültigen Lärm-Immissionsrichtwerte IRW in dB(A) nach Nummer 6.1 TA Lärm geführt, dieser reicht jedoch nicht aus, um zukünftig Lärmprobleme zu vermeiden, weil damit der erforderliche Schallschutz (und somit die hierfür festzusetzenden Nebenbestimmungen) nur auf die mittel- bis hochfrequente Geräuschemission abgestellt werden und die Dämpfung tieffrequenten Schalls unterbleibt.

Oftmals ist dem Schallschutzgutachter die tieffrequente Geräuschemission dieser BHKWs gar nicht bekannt bzw. wenn schon bekannt – dann gestaltet sich die tieffrequente Geräuschimmissionsprognose sehr schwierig, da besondere Eigenschaften der Schallausbreitung langer Schallwellen zu beachten sind, die mit den üblichen PC-Schallausbreitungsberechnungsprogrammen nicht ausgeführt werden können. Das Ergebnis dieser, in Bezug auf die tieffrequente Schallabstrahlung unvollständigen Schallimmissions- oder Falschprognosen ist dann ein nicht hinnehmbares

Defizit an notwendigen speziellen Schallschutzmaßnahmen, die eigentlich im Genehmigungsverfahren zur zukünftigen Verhinderung von tieffrequenten Lärmbelastungen zwingend festzusetzen wären. Dies ist die entscheidende Ursache für die nach Errichtung solcher Anlagen auftretenden tieffrequenten Lärmprobleme. Um diese sich im Nachhinein einstellenden Schallschutzprobleme zu vermeiden, müssen die Nebenbestimmungen differenziert formuliert, den besonderen Emissionseigenschaften der tieffrequenten Geräuschemission angepasst und auf die maßgeblich tieffrequent schallabstrahlenden Anlagenteile abgestellt werden. Deshalb besteht die dringende Aufgabe, Vorschläge für solche speziellen Nebenbestimmungen zu formulieren.

Im Nahbereich von Anlagengeräuschquellen oder Anlagenteilen mit vorwiegend tieffrequenter Geräuschemission entstehen interferenzbedingt enorme ortsabhängige Pegelschwankungen, die keinen eindeutigen Rückschluss auf das tatsächliche Emissionsverhalten der Anlagengeräuschquelle zulassen. Dies hat zur Konsequenz, dass z.B. die von der Genehmigungsbehörde im Rahmen von veranlassten Inbetriebnahmemessungen geforderte messtechnische Nachweisführung der Einhaltung von bestimmten festgesetzten „Schallemissionsbegrenzungen“ – bezogen auf die tieffrequente Schallemission – nach eigens hierfür ausgewählten Messmethoden verlangt. Gerade hierzu besteht aber akuter Nachholbedarf, d.h. – erforderlich ist die Ausarbeitung von geeigneten Messverfahren, um im Rahmen der von den Genehmigungsbehörden verlangten Inbetriebnahmemessungen die in den Nebenbestimmungen geforderte tieffrequente Schallemissionsbegrenzung messtechnisch nachweisen zu können. /2/

## 1.2 Aufbau und Funktion eines Blockheizkraftwerkes

Blockheizkraftwerke sind kompakte energieerzeugende Anlagen, die das Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung ausnutzen. Als vorteilhaft kann der hohe Gesamtnutzungsgrad angesehen werden. Je nach Art der Anlage variiert der Wirkungsgrad der Stromerzeugung von  $\eta_{el} = 25...50 \%$ . Durch die Nutzung der vom Verbrennungsmotor erzeugten Abwärme wird eine Primärenergieausbeute von bis zu  $\eta_{ges} = 90\%$  erreicht. Diese technisch innovative Nutzung von Primärenergieträgern soll deshalb näher betrachtet werden.

Prinzipiell kann die Funktionsweise von Blockheizkraftwerken mit folgender Abbildung verdeutlicht werden:

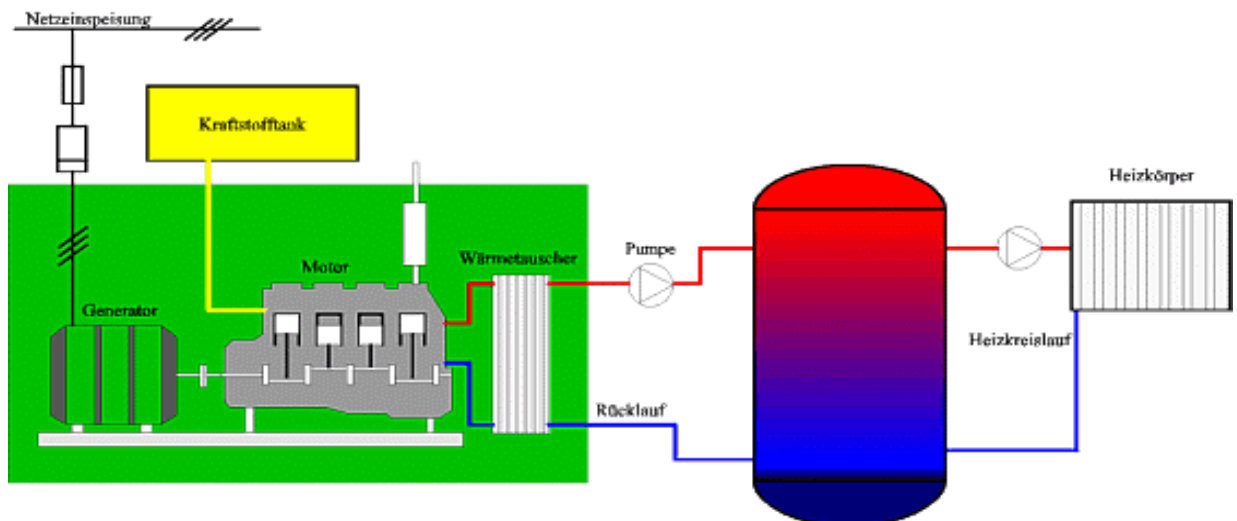


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Blockheizkraftwerkes /25/

Das Kernstück eines Blockheizkraftwerkes ist, wie auch in der Abbildung zu erkennen, ein Verbrennungsmotor (Fotos siehe Anlage 2), welcher je nach Art des zugeführten Kraftstoffes als Gas-Otto-Motor oder Zündstrahlmotor ausgelegt wird. Die zumeist aus der Kraftfahrzeugtechnik entnommenen Gas-Otto-Motoren saugen den Kraftstoff z.B. in Form von Bio- oder Erdgas an, mischen ihn mit Luft und verdichten das entstandene Gemisch. Durch eine Zündkerze wird das Kraftstoff-Luft-Gemisch dann entzündet. Verbrennungsmotoren mit Leistungen  $P_{el} < 190 \text{ kW}$  werden meist als turbogeladene Gas-Motoren ausgelegt. In den höheren Leistungsbereichen ( $P_{el} > 190 \text{ kW}$ ) kann durch die Verwendung von turbogeladenen mager-mix Aggregaten, d.h. es wird mehr Verbrennungsluft angesaugt als zur Entzündung

des Kraftstoff-Luft-Gemisches nötig ist, ein höherer Wirkungsgrad erreicht werden.

Zündstrahlmotoren hingegen nutzen das Prinzip der Selbstzündung, wie es bei Dieselmotoren genutzt wird. Durch Zugabe von 2 bis 10 % Zündöl in Form von Pflanzenöl, Heizöl oder Biodiesel, wird ein sog. Zündstrahl unter einem hohen Druck entzündet. Das angesaugte Kraftstoff-Luft-Gemisch wird durch den Strahl entzündet und verbrannt. Zumeist wird für Zündstrahlmotoren Biogas als Kraftstoff verwendet. /23/

Durch den Verbrennungsvorgang in den Motoren entstehen unterschiedliche Arten von Energie sowie Verbrennungsprodukte in Form von Abgasen, welche über Rohrleitungen mittels eines meist aus Edelstahl gefertigten Abgaskamins in die Umwelt abgeführt werden. Neben nutzbarer thermischer und elektrischer Energie entsteht auch unerwünschte Energie in Form von mechanischer Energie, welche z.B. als Schall über die Motoroberfläche, daran angekoppelte Elemente oder den Abgaskamin emittiert wird (Ausführungen dazu folgen im Kapitel 1.3).

Die elektrische Energie wird durch einen Generator erzeugt, welcher mit der Kurbelwelle des Motors verbunden ist. Um einen netzsynchronen Betrieb des Generators von  $f = 50 \text{ Hz}$  zu gewährleisten, ist eine konstante Drehzahl des Verbrennungsmotors von  $n = 1500 \text{ 1/min}$  vorauszusetzen. Der Hauptteil des erzeugten Stroms wird in das öffentliche Stromnetz eingespeist, nur ein geringer Teil dient der lokalen Versorgung.

Die durch den Verbrennungsprozess entstehende thermische Energie wird über den Kühlwasserkreislauf des Motors und über den heißen Abgasstrom mit Hilfe eines Abgaswärmetauschers abgegriffen. Als vorteilhaft erweist sich die Installation eines Pufferspeichers. Im oberen Bereich des Speichers wird die für den Heizkreislauf notwendige Wärme entnommen. Das rücklaufende kalte Wasser fließt in den unteren Bereich des Pufferspeichers und fungiert als Kühlsystem für den Verbrennungsmotor. Kurzfristige Temperaturänderungen können aufgrund der Trägheit des Pufferspeichers mittels Regelungstechnik über den Verbrennungsmotor ausgeglichen werden. /24/

### 1.3 Schallentstehung an Blockheizkraftwerken

Um den optimalen Betrieb eines BHKWs zu garantieren, ist eine Vielzahl technischer Voraussetzungen notwendig. Dabei müssen auch schalltechnische Belange mit bedacht werden, insbesondere dann, wenn schutzbedürftige Wohnbebauung im nahen Umfeld der Anlage vorzufinden ist. Deshalb soll sich dieser Gliederungspunkt mit den verschiedenen Geräuschquellen eines Blockheizkraftwerkes und deren Geräuschcharakteristik kurz beschäftigen. Die wesentlichsten Quellen sollen anhand der folgenden Abbildung benannt und anschließend erläutert werden.



Abbildung 2: Schallquellen an einem Blockheizkraftwerk (in Containerbauweise)

## **BHKW-Motorblock und Kapsel**

Als eine wesentlichsten Quellen eines BHKWs ist der Motorblock des Verbrennungsmotors zu benennen. Durch den Betrieb des Motors wird der Motorblock zu Schwingungen angeregt, die als Schall in die Umgebung abgestrahlt werden. Um das ungehinderte Ausbreiten dieser Schallwellen in die Umwelt zu verhindern wird der Motorblock deshalb durch eine Kapsel (z.B. massive Gebäude oder Container) eingehaust.

In letzter Zeit wird neben der Integration des BHKWs in bestehende Gebäude (siehe Anlagen 7, 8, 9) oft die eben genannte Containerbauweise aus z.B. umgebauten Containern wie sie in der Schifffahrt vorkommen (siehe Anlage 1, 6), bevorzugt.

Dies ist preisgünstiger als der Bau von massiven Gebäuden, führt aber gerade bei geringen Abständen zur nächstgelegenen Wohnbebauung oft zu Lärmbeschwerden, da durch die zumeist ungenügende Entkopplung des Verbrennungsmotors vom Container ein hoher Anteil an Körperschall in die Hülle eingetragen und letztendlich als Luftschall abgestrahlt werden kann. Das im Zusammenhang mit der Containerbauweise geschilderte Problem kann natürlich ebenso bei massiven Gebäuden auftreten.

Die Schallabstrahlung durch die Einhausung besitzt zumeist einen tieffrequenten Charakter. Dies ist darauf zurückzuführen, dass höher frequente Schallanteile durch die Kapsel relativ gut gedämmt und gedämpft werden – tieffrequente Schallanteile verbleiben und werden von der Kapselhülle abgestrahlt.

Die tieffrequente Schallabstrahlung der Einhausung setzt sich grundsätzlich aus zwei Komponenten zusammen, der Körper- und Luftschallübertragung. Die Körperschallentstehung beruht auf dem Schwingungseintrag des BHKWs in den Boden bzw. über ungenügend entkoppelte Verbindungen mit der Einhausung, wie z.B. Rohrleitungen. Die Luftschallanregung der Kapselhülle hingegen wird durch den vom BHKW im Innenraum der Einhausung erzeugten Luftschallpegel bestimmt.

Der Körperschalleintrag stellt bei einem BHKW das am schwersten zu behebende Problem dar. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die

schalltechnische Optimierung der Zu- und Abluftöffnungen, Notkühler und des Abgaskamins meist dazu führt, dass durch die nun niedrigen Pegel dieser Quellen die Luftschallabstrahlung der Einhausung durch Körperschalleintrag zur dominierenden Quelle wird. Für einen solchen Fall kann deshalb bei geringen Abständen zur Wohnnachbarschaft eine Störwirkung nicht ausgeschlossen werden, wenngleich die gesetzlichen Richtwerte eingehalten werden.

### **Zu- und Abluftöffnungen**

Der Charakter der Schallabstrahlung dieser Quellen kann als relativ breitbandig beschrieben werden, sofern die Flächen der Durchführungen nicht zu klein ausgelegt wurden und Strömungsgeräusche durch den Luftdurchsatz entstehen. Für den Fall, dass schlecht dimensionierte bzw. keine Schalldämpfer in den Durchführungen vorhanden sind, kann die Wirkung einer gut schallgedämmten Einhausung extrem herabgesetzt werden. Die durch den Betrieb des BHKWs erzeugten Schallwellen könnten dann fast ungehindert in die Umwelt gelangen. Der Einsatz von Kulissenschalldämpfern in den Durchführungen sollte hierbei jedoch Abhilfe schaffen.

### **Kaminöffnung**

Über den Kamin gelangen neben den Abgasen des Verbrennungsmotors auch Schallwellen in die Umwelt. Das Geräusch der Abgasanlage, welches über die Kaminöffnung abgestrahlt wird, ist dabei auf eine schlagartige Entspannung der Verbrennungsgase beim Öffnen des Auslassventils des Verbrennungsmotors zurückzuführen. Es bilden sich in schneller Folge Druckpulsationen von den einzelnen Zylindern aus, die zahlreichen Reflexionen in der Rohrleitung und in den Schalldämpfern unterliegen (siehe Ausführungen im Punkt 3).

In vielen Fällen stellt der **Abgaskamin die problematischste Schallquelle** dar, da die zumeist **tieffrequenten Spektralanteile** über den üblichen Abgasschalldämpfer nicht genug gedämpft werden und sie sich bedingt durch deren gute Beugung um Hindernisse fast ungehindert in der Umgebung ausbreiten können. Zudem befindet sich die Kaminöffnung in einer solchen



Höhe, dass der emittierte Schall nicht bzw. nur sehr schlecht durch Hindernisse – wie Gebäude – abgeschirmt wird.

Deshalb soll im Rahmen der Diplomarbeit ein besonderes Augenmerk auf diese Teilschallquelle eines BHKWs gelegt werden.

### **Not- und Gemischkühler**

Abhängig von der Höhe der erzeugten thermischen Leistung des BHKWs sind Notkühler unterschiedlicher Anzahl und Größe notwendig, um die vom Verbrennungsmotor erzeugte, nicht genutzte Abwärme in die Umgebung abzugeben. Da diese Notkühler betriebsbedingt im Freien aufgestellt werden müssen, sind sie neben den aus dem Abgaskamin emittierten Schallwellen nicht selten der Grund von Lärmbeschwerden.

Je nach Hersteller variiert die akustische Qualität der Lüfter, die besonders von den Faktoren Drehfrequenz, Lüfterdurchmesser, Anzahl und Form der Rotoren und der Art des Motors abhängig ist. Für jeden Lüfertyp ergibt sich somit ein individuelles Schalleistungsspektrum. Akustisch optimierte Notkühler mit einem geringen Schalleistungspegel und einem ausgeglichenem bzw. breitbandigem Frequenzspektrum stehen einer Auswahl schalltechnisch problematischer Notkühler mit hohen Schalleistungspegeln und tonalen Komponenten im Frequenzspektrum gegenüber. Solche Komponenten können sowohl im Bereich des Normalschalls ( $f > 90 \text{ Hz}$ ), als auch im Bereich des tieffrequenten Schalls ( $f \leq 90 \text{ Hz}$ ) liegen.

In Fällen geringer Abstände des BHKWs zur nächstgelegenen schutzbedürftigen Wohnbebauung sollte deshalb die Auswahl der Notkühler den Anforderungen der Abgasstrecke des BHKWs an den Schallschutz in nichts nachstehen. An dieser Stelle seien sog. „Langsamläufer“ genannt, welche aufgrund ihrer geringen Drehzahl nur einen geringen Schalleistungspegel erzeugen.

Ebenso ist es sinnvoll, Notkühler an geeignete Standorte z.B. an den von Immissionsorten abgewandten Seiten von Gebäuden zu positionieren.



## 2 Tieffrequenter Schall

Wie im Vorkapitel beschrieben, werden durch den Betrieb von BHKWs maßgeblich tieffrequente Schallwellen in die Umwelt abgestrahlt. Demnach soll sich dieses Kapitel den Besonderheiten dieser Schallart widmen. Neben dem Vergleich zum Normalschall (Bereich  $90 \text{ Hz} < f < 20 \text{ kHz}$ ), soll auch die unterschiedliche Wirkung auf den Menschen im Mittelpunkt der Betrachtungen stehen. Der Abschluss des Kapitels 2 wird mit Erläuterungen zum Bewertungsverfahren DIN 45680 „Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschemission in der Nachbarschaft“ /11/ gebildet.

### 2.1 Definition und Schallquellen

Nach Punkt 7.3 der TA Lärm /13/ werden Geräusche als tieffrequent definiert, wenn sie vorherrschende Energieanteile im Frequenzbereich  $f < 90 \text{ Hz}$  besitzen. Der Bereich des tieffrequenten Schalls kann in den tieffrequenten Hörschall (Bereich  $18 \text{ Hz} < f < 90 \text{ Hz}$ ) und den Infraschall (Bereich  $f < 18 \text{ Hz}$ ) untergliedert werden. /11/

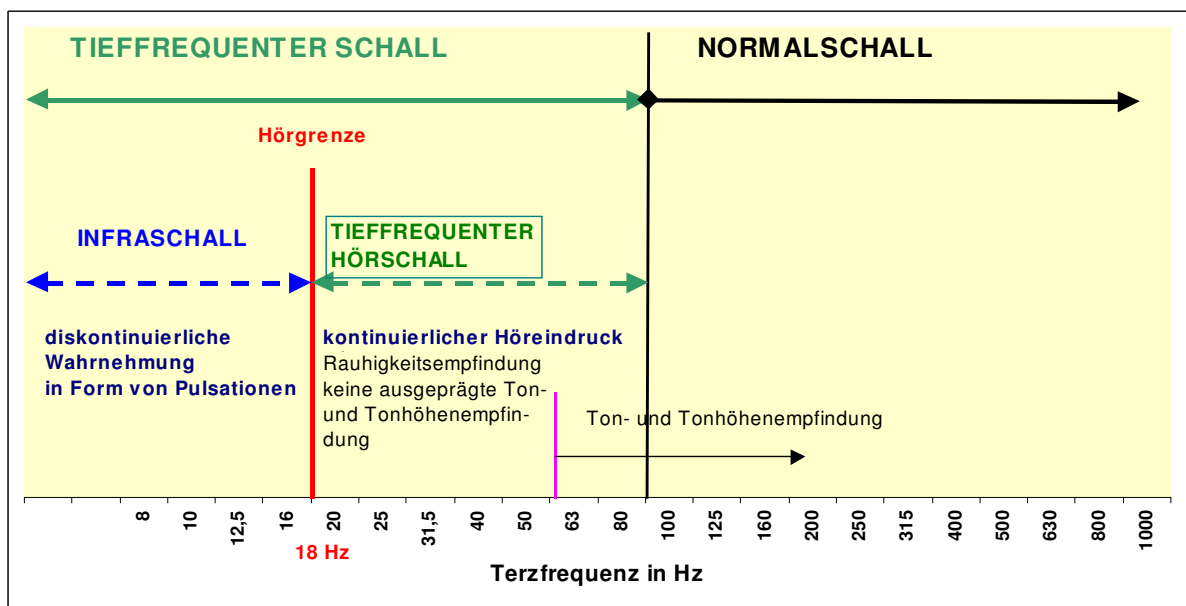


Abbildung 3: Übersicht der verschiedenen tieffrequenten Schallarten /4/

Der Frequenzbereich von  $f = 90 \text{ Hz}$  bis  $f = 60 \text{ Hz}$  ist gekennzeichnet durch einen Übergang vom Bereich des Normalschalls in den Bereich des tieffrequenten Schalls. Das normale Tonhöhen- und Geräuschempfinden nimmt mit sinkender Frequenz ab. Treten in dem genannten Frequenzbereich **tonhaltige** Geräusche auf, so werden diese von betroffenen Personen als besonders belästigend beschrieben. BHKWs emittieren mit teilweise hoher Energie Schall der diesem Frequenzbereich zuzuordnen ist (z.B.  $f_{\text{BHKW}} = 75 \text{ Hz}$ ). Im Gegensatz zu den als nächstes genannten Frequenzbereichen, des tieffrequenten Hörschalls  $f < 60 \text{ Hz}$  und des Infraschalls sind Sekundäreffekte eher unbedeutend.

Im Frequenzbereich des extrem tieffrequenten Schalls, der sich von  $f \approx 60 \text{ Hz}$  bis  $f \approx 18 \text{ Hz}$  erstreckt, besteht noch ein kontinuierlicher Höreindruck von auf das Ohr einwirkenden Dauertönen oder Dauer-Geräuschen. Die Tonhöhenempfindung ist im Gegensatz zum o.g. Bereich jedoch nur bedingt ausgeprägt. Oft werden Fluktuationen bzw. Schwebungen, also ein Ansteigen bzw. Abfallen der Lautstärke, wahrgenommen. Weiterhin werden Töne im betrachteten Frequenzbereich nicht als glatt, sondern rau gehört (Rauhigkeitsempfindung). Besonderes Augenmerk ist auf die Frequenz  $f = 30 \text{ Hz}$  zu legen, da in diesem Bereich die Resonanzfrequenz des menschlichen Kopfes (Schwingsystem „Kopf-Schädel-Gehirn“) vorzufinden ist. Das Einwirken von Schall dieser Frequenz ist ein wesentlicher Grund für das von betroffenen Personen geschilderte Dröhn-, Schwingungs- oder Druckgefühl im Kopf, welches über längere Einwirkzeit als unerträglich beschrieben wird.

Hierbei muss nochmals bemerkt werden, dass die genannten Störwirkungen nur bei stationären Dauergeräuschen auftreten (kurzzeitige tieffrequente Schalleinwirkungen z.B. in Form einer LKW-Vorbeifahrt an einer Person führt nicht zu den genannten Störwirkungen).

Darüber hinaus können in dem genannten Frequenzbereich Sekundäreffekte, also die tieffrequente Schallanregung leichter Bauteile und die Abstrahlung von Normalschall der Bauteile infolge dieser Schwingungsanregung, auftreten.

Im Bereich des Infraschalls ( $f < 18 \text{ Hz}$ ) ist kein ausgeprägtes Hörempfinden mehr vorhanden, da die Wahrnehmung der Tonhöhe fehlt. Wirkt Schall dieser Frequenzen auf Menschen ein, so kann nicht mehr von „Hörbarkeit“ sondern von nur von „Wahrnehmung“ gesprochen werden. Der Infraschall wird diskontinuierlich in Form von Pulsationen und Vibrationen wahrgenommen. Das Auftreten von Infraschall ist u.a. mit Unsicherheits- und Angstgefühlen, einer Abnahme des Leistungs- und Konzentrationsvermögens, Ermüdung, Schläfrigkeit und Ohrendruck bei den exponierten Personen verbunden. Weiterhin lässt sich noch ein Absenken der Atemfrequenz sowie das Auftreten von Kopfschmerzen bei betroffenen Personen nachweisen. Darüber hinaus treten, wie im Bereich des extrem tieffrequenten Hörschalls (unter  $60 \text{ Hz}$ ) Sekundäreffekte, wie Rütteln von Fenstern und Türen, die wiederum Schall abstrahlen können, sowie Vibrationen von leichten Gebäudeteilen und Gegenständen auf. Die untere Grenzfrequenz der Schallwahrnehmung liegt bei  $f = 1 \text{ Hz}$ . /11/, /19/

### **Quellen**

Die Entstehung tieffrequentes Schalls kann entweder technischen oder natürlichen Ursprungs sein. Beispiele natürlicher Quellen sind Windströmungen, Wasserfälle, Vulkanausbrüche, Erdbeben und Donner. Meist weisen diese natürlichen Quellen jedoch ein relativ breitbandiges Spektrum sowie ein eher diskontinuierliches Zeitverhalten auf, wodurch sich im Bezug auf technische Quellen keine derart belastigende Wirkung ergibt.

Zu den technischen Quellen zählen u.a. Gasturbinen, Be- und Entlüftungsanlagen, Kompressoren, Verkehrsmittel, Bauwerke, Kies- und Sandsiebe, Rüttelplatten für Betonfertigteile, Schwingrinnen, Sprengungen, elektroakustische Beschallungsanlagen (z.B. Diskotheken), Windenergieanlagen, Heizungs- und Klimaanlage einschließlich deren Abgaskamine sowie langsam laufende Verbrennungsmotoren wie sie z.B. in Blockheizkraftwerken zum Einsatz kommen.

## 2.2 Besonderheiten des tieffrequenten Schalls

Anhand der folgenden Darstellung sollen weitere Besonderheiten des tieffrequenten Schalls erläutert werden.

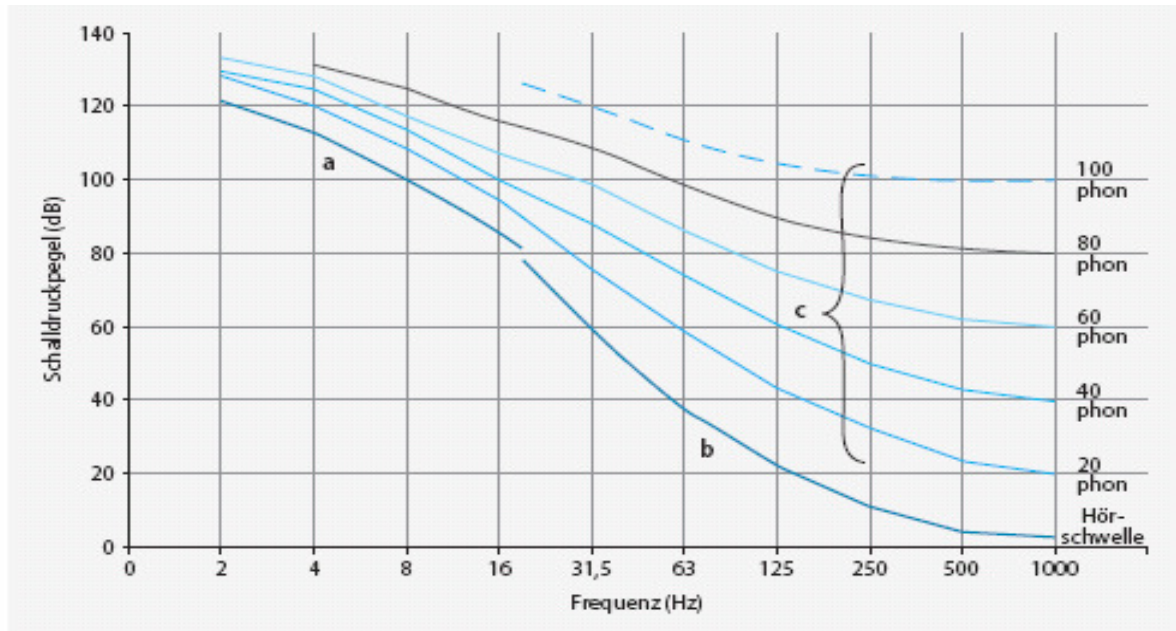


Abbildung 4: Hörschwelle und Kurven gleicher Lautstärke im Frequenzbereich unter 1000 Hz, a) nach Møller und Pedersen (2004), b) nach DIN EN ISO 389-7 (2006), c) Kurven gleicher Lautstärke im Frequenzbereich von 20 – 1000 Hz nach DIN ISO 226 (2003) und im Frequenzbereich  $f < 20$  Hz nach Møller und Andresen (1984) /20/

Die Abbildung zeigt die Lautstärkekurven (Isophonenkurven) in Abhängigkeit von der Frequenz. Die Lautstärke ist eine psychoakustische Größe, die von Faktoren wie dem Schalldruckpegel, dem Frequenzspektrum sowie dem Zeitverhalten des Schalls abhängig ist. Die unterschiedlichen Phonkurven entsprechen bei einer Frequenz von  $f = 1000$  Hz dem Schalldruckpegel. Allgemein gilt, je tiefer die Frequenz, umso größer muss der Schalldruckpegel sein, damit ein Mensch Schall dieser Frequenz wahrnehmen kann. Dieser Zusammenhang wird durch die in der Abbildung 4 eingetragene Hörschwellenkurve, welche mit sinkender Frequenz extrem ansteigt, berücksichtigt. Ein Schallereignis kann nur dann wahrgenommen werden, wenn die Hörschwelle überschritten wird. Die in der Abbildung 4 angegebene Hörschwelle schützt jedoch nicht alle exponierten Menschen. Nach der TA Lärm werden die Hälfte der Personen geschützt, da sich die Bewertung des tieffrequenten Schalls auf die 50%-Hörschwelle stützt. Bei besonders sensiblen

Personen kann die Wahrnehmungsschwelle jedoch um 10 bis 12 dB niedriger liegen, wodurch sich eine erhöhte Störwirkung dieser Personen ergibt (in der Überarbeitung der DIN 45680 – siehe Punkt 2.4 – soll auch dieser sensiblere Personenkreis stärker geschützt werden).

Weiterhin ist in der Abbildung 4 zu erkennen, dass sich die unterschiedlichen Lautstärkekurven mit sinkender Frequenz einander annähern. Das bedeutet, Infraschall bzw. tieffrequenter Schall besitzt oberhalb der Hörschwelle eine stärkere Störwirkung als Schallpegel im normalen Hörbereich. Bei tieffrequenten Geräuschen der Frequenz  $f = 20$  Hz verdoppelt sich die Lautstärke schon bei einer Schalldruckpegelerhöhung von 5 dB, im Gegensatz zu etwa 10 dB im normalen Hörbereich (z.B. bei  $f = 1000$  Hz). /20/

### 2.3 A-Bewertungskurve und Schlussfolgerungen bezüglich der Beurteilung des tieffrequenten Schalls

Auf Grundlage der Isophonenkurven (Abbildung 4) wurde die A-Bewertungskurve angelehnt (die A-Kurve entspricht etwa der gespiegelten 40-phon Kurve). In der folgenden Abbildung ist diese Kurve dargestellt:

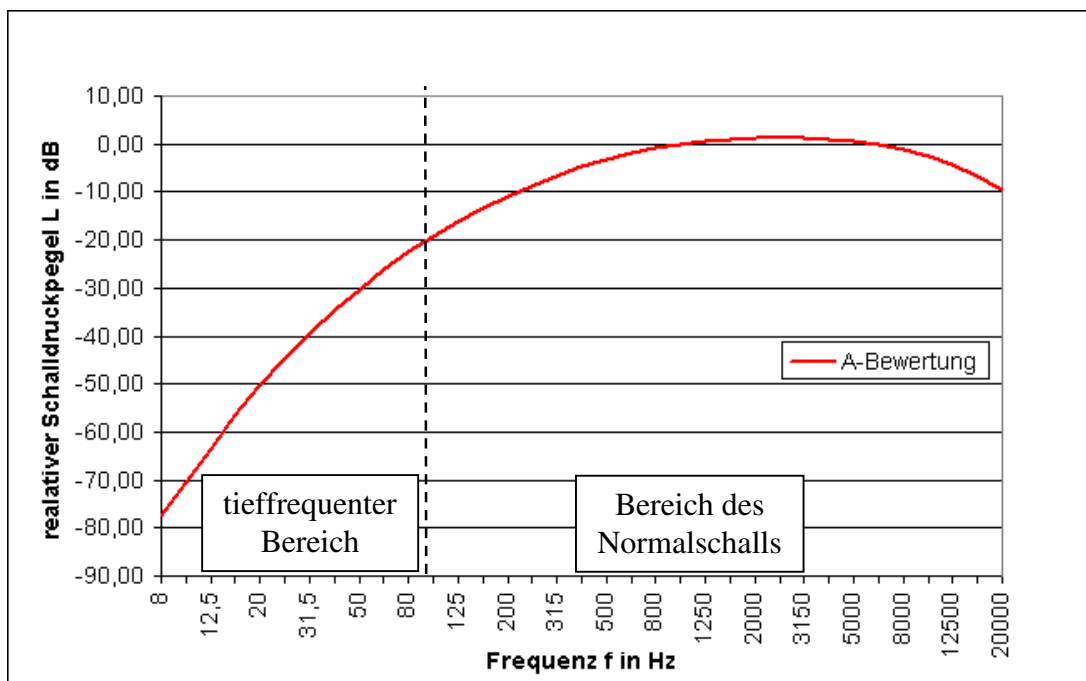


Abbildung 5: A- Bewertungskurve in Abhängigkeit von der Frequenz

Mittels des A-bewerteten Schalldruckpegels werden Geräusche entsprechend ihrer Störwirkung, beruhend auf dem Lautstärkeempfinden des Menschen,

beurteilt. Im Bereich des Normalschalls korreliert die Störwirkung mit dem Lautstärkeempfinden. Je lauter ein Geräusch wahrgenommen wird, desto größer ist auch dessen Lästigkeit. Für die Beurteilung von mittel- und hochfrequenten Geräuschimmissionen ist die Verwendung der A-Bewertung also richtig, da für diesen Frequenzbereich eine enge Verbindung zwischen Lautstärke und Lästigkeitsempfindung besteht.

Geräusche die hohe Energieanteile im tieffrequenten Bereich besitzen, werden dagegen durch die A-Bewertungskurve extrem gedämpft. Dies ist auf den Frequenzgang des menschlichen Ohres zurückzuführen, welcher durch die A-Bewertungskurve berücksichtigt wird. Schalldruckpegel gleicher Größe für tieffrequente Schallenergien bewirken eine geringere Lautstärke als dies z.B. bei Schallenergien im mittelfrequenten Bereich der Fall ist. Das bedeutet z.B. für zwei Geräusche mit einem unterschiedlichen Frequenzspektrum, dass ein tieffrequentes Geräusch sehr viel leiser als ein Geräusch mit einem mittelfrequenten Charakter gehört wird, obwohl die beiden Geräusche den gleichen Schalldruckpegel erzeugen.

Wirkt beispielsweise auf einen Immissionsort ein Geräusch mit hohen Energieanteilen im mittel- und hochfrequenten Bereich ein, so wird der dort gemessene dB(A)-Pegel ausschließlich durch diese Energieanteile gebildet, obgleich auch tieffrequente Spektralanteile mit hoher Energie im Geräusch vorhanden sind. Wirkt jedoch ein Geräusch mit hohen Energieanteilen im tieffrequenten Bereich auf einen Immissionsort ein, so erfährt dieses Geräusch eine so starke Dämpfung (durch die A-Bewertung), sodass sich nur sehr kleine dB(A)-Pegel ergeben. /4/

An dieser Stelle stellt sich nun die Frage, welche Bedingungen erfüllt sein müssen, um tieffrequenten Schall wahrzunehmen und welche Schlussfolgerungen für eine lästigkeitsadäquate Bewertung des tieffrequenten Schalls gezogen werden können.

Als **erste Bedingung** für das Wahrnehmen des tieffrequenten Schalls ist, wie auf für den Normalschall, das **Überschreiten der Hörschwelle** (siehe Abbildung 4) durch das einwirkende Geräusch zu nennen.

Wird die Hörschwelle nur gering überschritten, so treten die ersten Störwirkungen auf. Mit nur geringer Erhöhung der Schallenergie, nimmt die Störwirkung der betroffenen Personen extrem zu (was das Annähern der verschiedenen Lautstärkekurven in Abbildung 4 belegt).

Die **zweite Bedingung** der tieffrequenten Schallwahrnehmung beinhaltet das Wirken des **Verdeckungseffektes**. Um tieffrequenten Schall wahrzunehmen darf er nicht durch „lauten“ höherfrequenten Normalschall verdeckt werden.

Der Verdeckungseffekt kann anhand der Neigung der Frequenzkurve für den Schalldruckpegel erläutert werden. Fällt der Schalldruckpegel mit steigender Frequenz nur gering, so dominiert lauter Normalschall. Ist die Neigung jedoch groß, so überwiegt tieffrequenter Schall, der als leise empfunden wird. Für den Fall, dass die Neigung der Pegel-Frequenzkurve mindestens 6 dB/Oktave beträgt, wird tieffrequenter Schall nicht mehr durch höherfrequenten verdeckt.

Um diese Neigung messtechnisch zu erfassen, muss der A-bewertete und der C-bewertete Schalldruckpegel als Terz- oder Oktavspektrum gemessen werden. Ist die Neigung der Pegel-Frequenzkurve  $\geq 6$  dB/Oktave so beträgt die Differenz  $L_{Ceq} - L_{Aeq} \geq 20$  dB.

Die Schlussfolgerungen für eine geeignete Bewertung des tieffrequenten Schalls auf Grundlage dieser beiden Bedingungen finden in der im folgenden Punkt beschriebenen DIN 45680 /11/ mit Berücksichtigung.



## 2.4 Beurteilung nach DIN 45680

Aufgrund der in den Vorkapiteln aufgeführten Unterschiede von tieffrequentem Schall in Bezug auf Normalschall, ist dieser auch gesondert zu messen um ihn lästigkeitsadäquat beurteilen zu können (siehe Punkt 7.3 der TA Lärm /13/). Das auf diese Beurteilung abgestellte Messverfahren der DIN 45680 /11/ soll hier deshalb näher beschrieben werden.

Danach sind für Geräusche, die ausgeprägte Anteile im tieffrequenten Bereich besitzen, Messungen im Innenraum von Räumen durchzuführen. Ein tieffrequentes Geräusch ist vorhanden, wenn die Bedingung  $L_{Ceq} - L_{Aeq} > 20$  dB innerhalb des Raumes und bei geschlossenen Fenstern erfüllt ist. Messungen außerhalb von Gebäuden können nur orientierend Aussagen über Belästigungen in den Innenräumen treffen. Im Falle, dass die betroffenen Räume genau die Abmessung der einfallenden Schallwelle der Wellenlänge  $\lambda$  bzw.  $\lambda/2$  besitzen, treten Resonanzeffekte in den Räumen auf, die zu Pegelerhöhungen, besonders in den Raumecken, (siehe Abbildung 6) führen. Im Freien erhobene Messungen können solche Phänomene nicht mit berücksichtigen.

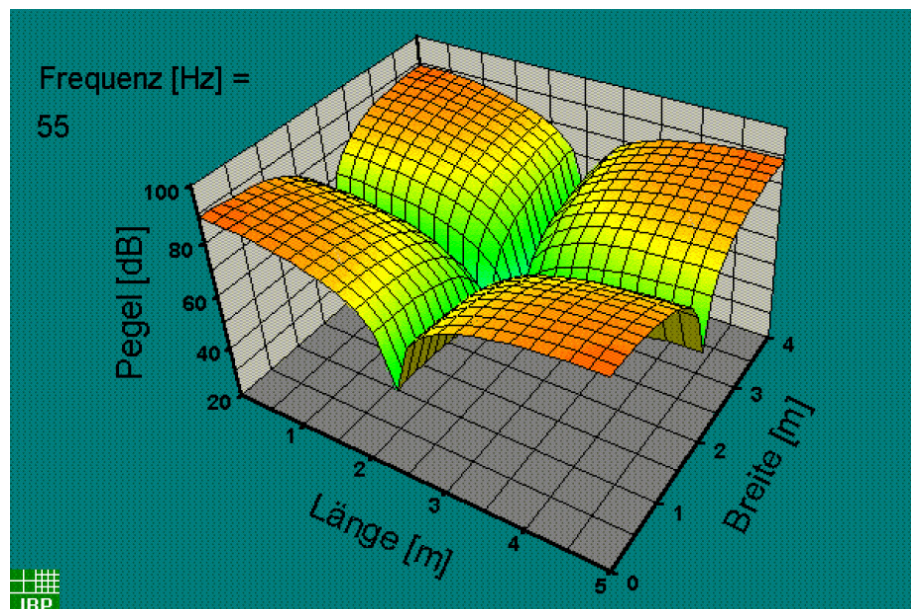


Abbildung 6: Pegelverteilung im rechteckigen Raum (5 \* 4 \* 3 m) für  $f = 55$  Hz /22/

Da sich in den **Raumecken** oft auch Aufenthaltsorte von Personen befinden, ist es von enormer Bedeutung speziell dort die Messungen durchzuführen.



Im Falle, dass die Bedingung  $L_{\text{Ceq}} - L_{\text{Aeq}} > 20 \text{ dB}$  im Innenraum des Gebäudes bzw. den Raumecken (in  $s \approx 1 \text{ m}$  Abstand von den Wänden) erfüllt ist, sind die **Terzfrequenzen** der tieffrequenten Geräuschimmission (Terzbänder 8 Hz bis 100 Hz) zu messen. Je nach Dauer der auftretenden tieffrequenten Geräuschimmission ( $T_e$ ), ist ein Terz-Beurteilungspegel  $L_{\text{Terz},r}$  für die Beurteilungszeit ( $T_r$ ) zu berechnen.

$$L_{\text{Terz},r} = L_{\text{Terz},eq} + 10 \log \left( \frac{T_e}{T_r} \right) \text{dB} \quad [\text{GL 2.1}]$$

Dieser Terz-Beurteilungspegel  $L_{\text{Terz},r}$  ist letztendlich mit der Hörschwelle nach DIN 45630-2 zu vergleichen. Für den Fall, dass sich Überschreitungen der Hörschwellenpegel ergeben, sind diese in den betreffenden Terzen zu kennzeichnen (Beispiel siehe Anlage 3).

Darüber hinaus ist zu prüfen, ob es sich bei den einwirkenden tieffrequenten Geräuschen um solche mit deutlich hervortretenden Einzeltönen handelt. Ein Einzelton ist dann vorhanden, wenn die Differenz zweier Nachbarterzen mit den entsprechenden Pegeln größer als  $\Delta L = 5 \text{ dB}$  ist und wenn nach dem Höreindruck der Messperson am Messort ein solcher Ton wahrgenommen wird. In dem Fall, dass ein Geräusch einen deutlich hervortretenden Einzelton enthält, sind die folgenden Differenzen zu bilden:

$$\begin{aligned} \Delta L_1 &= L_{\text{Terz},r} - L_{\text{HS}} \\ \Delta L_2 &= L_{\text{TerzFmax}} - L_{\text{HS}} \end{aligned} \quad [\text{GL 2.2}]$$

Für den Fall, dass ein Geräusch keine deutlich hervortretenden Einzeltöne enthält, sind die A-bewerteten Terz-Beurteilungspegel  $L_{\text{Terz},r}$  im Frequenzbereich von  $f = 10 \text{ Hz}$  bis  $f = 80 \text{ Hz}$  nach GL 2.3 energetisch zu addieren. Unterschreiten die Terzpegel des Geräusches die Werte der Hörschwelle  $L_{\text{HS}}$ , so finden diese Werte keine Berücksichtigung in der Gleichung.

$$L_r = 10 \log \sum_i 10^{0,1 \cdot (L_{\text{Terz},r,i} + K_{\text{Ai}})} \quad [\text{GL 2.3}]$$

Die Werte für  $K_{\text{Ai}}$  können aus der Tabelle der Anlage 4 entnommen werden.

Eine Belästigungswirkung der betroffenen Personen im Innenraum von Wohnräumen kann im Allgemeinen ausgeschlossen werden, wenn die in den folgenden Tabellen aufgeführten Anhaltswerte für die jeweilige(n) Terzmittenfrequenz(en) nicht überschritten werden.

Tabelle 1: AHWs bei deutlich hervortretenden Einzeltönen aus [GL 2.2]

Beurteilungszeit	$\Delta L_1$ in dB bei Terzmittenfrequenz				$\Delta L_2$ in dB bei Terzmittenfrequenz			
	8 Hz	10 bis 63 Hz	80 Hz	100 Hz	8 Hz	10 bis 63 Hz	80 Hz	100 Hz
Tagesstunden	5	5	10	15	15	15	20	25
Nachtstunden	0	0	5	10	10	10	15	20

Tabelle 2: AHWs in sonstigen Fällen aus [GL 2.3]

Beurteilungszeit	$L_r$ in dB	$L_{AFmax}$ in dB
Tagesstunden	35	45
Nachtstunden	25	35

Im Falle einer Überschreitung der in den Tabellen 1 und 2 genannten Anhaltswerte ist vom Betreiber an den die tieffrequente Schallemission erzeugenden Anlagen entsprechender Schallschutz zu realisieren.

### **3 Theoretische Betrachtungen**

Die sich im Folgenden anschließenden Ausführungen sollen sich detailliert mit der theoretisch zu erwartenden Schallabstrahlung eines BHKWs beschäftigen. Zum besseren Verständnis der beim Betrieb eines BHKWs stattfindenden akustischen Prozesse, wird im Kapitel 3.1 die Schallentstehung in einem Verbrennungsmotor erläutert.

Die Weiterleitung der Schallwellen vom Motor über die Rohrleitungen und den Schalldämpfer bis hin zur Kaminöffnung wird im Punkt 3.2 schrittweise kurz beschrieben.

Im Kapitel 3.3 schließen sich Beschreibungen der Schallabstrahlung des Abgaskamins an. Interessant für die Zielstellung der Diplomarbeit sind dabei die Richtcharakteristik sowie die akustischen Effekte im Nah- und Fernfeld des Abgaskamins für die abgestrahlten tieffrequenten Schallwellen.

Im dann folgenden Gliederungspunkt 3.4 wird die Schallausbreitung der tieffrequenten Spektralanteile im Freien sowie den Einfluss von auftretenden Reflexionen durch Gebäude und den Boden beschrieben.

Der Eintrag des tieffrequenten Schalls in Wohnräume und die dabei auftretenden Probleme sollen den Abschluss der theoretischen Betrachtungen im Kapitel 3.5 bilden.

### 3.1 Emissionen durch Verbrennungsmotoren

Die Schallerzeugung im Verbrennungsmotor ist auf die explosionsartige Volumenänderung infolge der Verbrennungsreaktion in den Zylindern zurückzuführen. Es bilden sich in schneller Folge Druckpulsationen von den einzelnen Zylindern aus, wobei tiefe Frequenzen pegelbestimmend sind. /5/, /16/

Je nach Bauart und Leistung des zum Einsatz kommenden Verbrennungsmotors wird durch den Betrieb eine bestimmte Schallleistung  $P$  erzeugt. Mit der Schallleistung  $P$  und der Bezugsgröße  $P_0$  kann der Schallleistungspegel  $L_w$  berechnet werden: /10/

$$L_w = 10 \lg \frac{P}{P_0} \text{ dB} \quad [\text{GL 3.1}]$$

Die Schallleistung ist dabei ein Maß für die pro Zeiteinheit (1s) von einer Schallquelle in jeden Raumwinkel ihrer Umgebung abgestrahlten Schallenergie. Sie stellt dabei eine akustisch invariante Kenngröße dar, da sie unabhängig von Rückwirkungen des abgestrahlten Schallfeldes ist. /5/

Der Schallleistungspegel ist meist in den Datenblättern der zum Einsatz kommenden Verbrennungsmotoren zu finden. Dabei wird zwischen dem Schallleistungspegel der a) über den Motorblock und b) über die Abgasmündung abgestrahlt wird, unterschieden. Der höhere Schallleistungspegel wird stets über die Abgasmündung (ungedämpft) emittiert. Neben der Angabe der Schallleistungspegel als Einzahlangabe werden je nach Hersteller auch oktav- bzw. terzbezogene Schallleistungsspektren angegeben. Aus diesem Spektrum können erste Rückschlüsse auf die zu erwartenden Emissionen an der Öffnung des Abgaskamins getroffen werden. Hierbei sei allerdings der Nachteil oktavbezogener Schallleistungsspektren genannt, da bei dem Zusammenfassen der zum Oktavband zugehörigen Terzbänder (drei Terzbänder werden zu einem Oktavband zusammengefasst) die Intensität der eventuellen tieffrequenten tonalen Komponente unklar ist.

Weiterhin sei bemerkt, dass die charakteristische Schallabstrahlung des Verbrennungsmotors (z.B. im Innenraum der Einhausung), nicht direkt mit der Schallabstrahlung am Abgaskamin verglichen werden kann. Der Motorblock dämmt und dämpft die tieffrequenten Schallwellen weitgehend, wobei sich, bedingt durch Resonanzanregung in den Rohrleitungen, am Abgaskamin ein anderes Frequenzspektrum als am Verbrennungsmotor ergibt, was folgende Abbildung belegt:

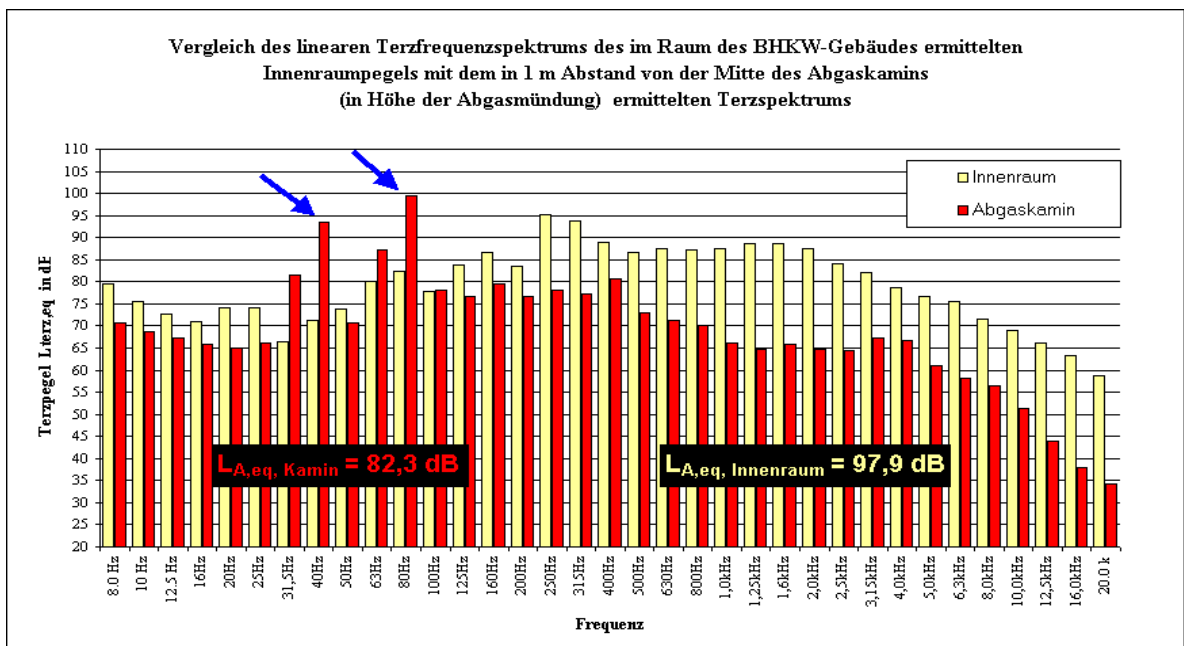


Abbildung 7: Vergleich der Spektren Innenraumpegel-Abgaskamin

Mit der folgenden Beziehung kann jedoch eine Aussage über die an der Kaminöffnung zu erwartenden Schallemissionen getroffen werden:

$$f = \frac{n}{60} \cdot i \cdot z \quad [\text{GL 3.2}]$$

Hierin bedeuten:

- f Erregerfrequenz des Motors in Hz
- n Motordrehzahl in 1/min
- z Anzahl der Zylinder
- i Arbeitsspiele pro Umdrehung ( i=1 für 2-Takter, i = 0,5 für 4-Takter)

Durch die im Verbrennung des Brennstoffgemisches im Verbrennungsmotor entsteht je nach Anzahl der vorhandenen Zylinder, der Arbeitsweise des Motors (2-Takt-Motor oder **4-Takt-Motor**) und der vorherrschenden Drehzahl eine spezifische Erregerfrequenz des Motors, welche mit der Gleichung GL 3.2 berechnet werden kann.

Ausgehend von einer konstanten Drehzahl der Verbrennungsmotoren für die zu betrachtenden BHKWs von  $n = 1500 \text{ 1/min}$  und der Annahme, dass die Motoren dem 4-Takt-Prinzip unterliegen, ergibt sich für die Gleichung 3.2 folgende Vereinfachung.

$$f = \frac{1500}{60} \cdot 0,5 \cdot z = \underline{\underline{12,5 \cdot z}} \quad [\text{GL 3.3}]$$

Eine weitere wichtige Größe ist die sog. Motorharmonische bzw. Motorordnung, da sie im Allgemeinen die den Gesamtpegel bestimmende Größe darstellt. Sie wird durch das Produkt aus  $i$  und  $z$  bestimmt.

$$\text{Motorordnung} = i \cdot z \quad [\text{GL 3.4}]$$

Beispielsweise resultiert für einen 4-Zylinder-4-Takt-Motor mit  $z = 4$  und  $i = 0,5$ , die 2. Motorordnung. /5/

Die sich aus den Gleichungen 3.3 bzw. 3.4 für eine unterschiedliche Anzahl an Zylindern ergebenden Motorordnungen und Erregerfrequenzen seien zur besseren Übersichtlichkeit in der folgenden Tabelle aufgeführt.

**Tabelle 3:** Übersicht über den Zusammenhang – Anzahl der Motorzylinder zur dominierend erzeugten Frequenz bei  $n = 1500 \text{ 1/min}$

Anzahl der Motorzylinder $z$	Motorordnung aus [GL 3.4]	Erregerfrequenz des Motors $f$ aus [GL 3.3] in Hz
3	1,5.	<b>37,5</b>
4	2.	<b>50</b>
5	2,5.	<b>62,5</b>
6	3.	<b>75</b>
8	4.	<b>100</b>
10	5.	<b>125</b>
12	6.	<b>150</b>
16	8.	<b>200</b>

Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass die Erregerfrequenz der Verbrennungsmotoren mit einer Anzahl von  $z = 4$  und  $z = 6$  (bzw. auch noch  $z = 8$ ) Zylindern im tieffrequenten Bereich liegt. Demnach sind Anlagen mit einer solchen Anzahl an Zylindern geeignet, tieffrequente Schallanteile dominierend über den Abgaskamin abzustrahlen.

Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass es sich bei denen in der Tabelle 3.1 angegebenen Motorordnungen um die theoretisch zu erwartenden Hauptordnungen handelt. In der Realität können jedoch, bedingt durch die bauliche Konzeption des BHKW-Motors, auch „Unterordnungen“ mit angeregt werden. Zur besseren Verständlichkeit dieses Sachverhaltes soll die folgende Darstellung dienen.

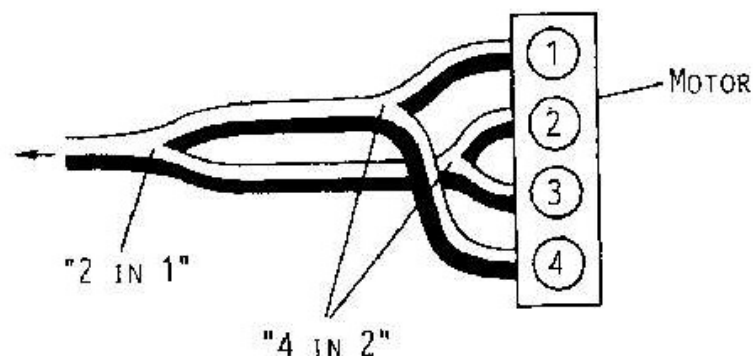


Abbildung 8: Asynchrone Zusammenführung der Abgasrohre an einem 4-Zylinder-4-Takt Reihenmotor /5/

Es ist zu erkennen, dass die Abgasrohre der Zylinder 1 und 4 sowie 2 und 3 symmetrisch zusammengeführt werden. Die beiden Zylinderpaare müssen jedoch zwangsläufig asymmetrisch zusammengeführt (die Weglängen des Zylinderpaares 1 und 4 ist in der Realität um 20 % größer als der Weg des Paares 2 und 3). Es entsteht kein reiner 4-Zylinder Charakter, sondern ein 2-Zylinder Charakter. Darüber hinaus ist es noch möglich, dass sogar ein 1-Zylinder Charakter vorliegen kann, wenn in den jeweiligen Rohrabschnitten Resonanzen angeregt werden.

Wird diese theoretische Annahme auf einen 12 Zylinder V-Motor übertragen (V-Motoren können triebwerksmechanisch als zwei um den V-Winkel  $\delta$  zueinander versetzte Reihenmotoren halber Zylinderzahl angesehen werden), so kann neben der zu erwartenden 6. Hauptordnung auch noch eine Ordnung des 3. oder sogar 1,5. Grades angeregt werden. Damit würden bei einem Verbrennungsmotor mit einer Anzahl von 12 Zylindern neben der dominierenden 150 Hz-Welle – die nicht mehr dem tieffrequenten Bereich zugehörig ist – auch noch Schallwellen mit den Frequenzen  **$f = 75 \text{ Hz}$**  oder sogar  **$f = 37,5 \text{ Hz}$**  angeregt werden.

Im Rahmen der Diplomarbeit wurden Schallmessungen an zwei 12-Zylinder V-Motoren durchgeführt (siehe Anlage 2b und 2d). Durch FFT-Analysen am Abgaskamin konnte neben einer Frequenz von  $f = 75 \text{ Hz}$  auch die Existenz der Frequenz bei  $f = 37,5 \text{ Hz}$  nachgewiesen werden (siehe Anlage 6 und 8). Dies kann wie schon o.g. mit der asynchronen Zusammenführung der Abgasrohre von den einzelnen Zylindern ausgehend in den Abgaskrümmen begründet werden. Durch die sich ergebenden Weglängenunterschiede kann von keinem reinen 12-Zylinder Charakter, sondern von einem **6- bzw. 3-Zylinder Charakter** gesprochen werden.



## **3.2 Schallleitung in Rohren und Schalldämpfer**

Nachdem die Schallentstehung durch den Verbrennungsmotor beschrieben wurde, soll nun die Weiterleitung des Schalls in der sich anschließenden Abgasstrecke kurz behandelt werden (Kapitel 3.2.1). Aufgrund der hohen Schallleistungspegel, die durch den Betrieb des Motors entstehen, ist es oftmals nötig einen Schalldämpfer in die Abgasstrecke von BHKWs einzubauen. Das Kapitel 3.2.2 beschäftigt sich demnach mit der Wirkungsweise verschiedener Schalldämpfertypen.

### **3.2.1 Schallausbreitung in Rohren**

In der Abgasstrecke von BHKWs werden die durch die Explosion des Brennstoffgemisches in den Zylindern des Verbrennungsmotors erzeugten Schallwellen über ein Rohrsystem in Richtung des Abgaskamins transportiert. Die Schallwellen unterliegen dabei einer Vielzahl an Reflexionen in den Rohrleitungen. Ausgehend von einem Schallleistungspegel  $L_w$  des Abgasstromes, wird dieser je nach Bauart der sich an den Motor anschließenden Rohrleitungen beeinflusst. Die Rohrsysteme können dabei aus geraden oder auch aus gekrümmten Teilabschnitten sowie aus Übergangs-, Verzweigungs- und Umlenkungsstücken bestehen. Die Art des in den Rohrleitungen erzeugten Schallfeldes ist weiterhin von den dominierenden Frequenzen, dem Durchmesser, der Wanddicke und der Dämmung des Rohres abhängig. Für eine hohe Rohrdämmung ergibt sich entsprechend eine geringe Schallabstrahlung über die Rohrwände – der wesentliche Anteil der inneren Rohrleitungsgeräusche wird weitergeleitet. Diese Weiterleitung erfolgt dabei gedämpft. Die Höhe der Dämpfung wird durch die Konstruktion der Rohrstrecken bestimmt. Für gerade Rohrabschnitte mit einem konstanten Rohrdurchmesser ist die Dämpfung im Vergleich zum Vorhandensein von vielen Formelementen, wie Umleitungen, Querschnittsänderungen an Rohrverzweigungen und an den Austrittsöffnungen, geringer. Die Dämpfung in geraden Rohrstrecken erfolgt durch Dissipation, also der Umwandlung von Schallenergie in Wärmeenergie, und durch Querdämmung an der Rohrwand.

Für Umlenkungen, Querschnittsänderungen und Austrittsöffnungen hingegen wird die Dämpfung maßgeblich durch Reflexionen bestimmt. An einer Rohrverzweigung wird die Schallleistung je nach Konstruktion aufgeteilt /5/.

Es ist auch möglich, dass die Verbrennungsgeräusche durch Resonanzanregung in den Rohrleitungen verstärkt werden, da die im Rohr weitergeleiteten Schallwellen mit den Rohrleitungen ein schwingungsfähiges System darstellen. Der Ausbildung dieser sog. Hohlraumresonanzen kann durch die Verstimmung des Systems z.B. durch die Verlängerung der Abgasanlage oder den Einsatz von Abgasschalldämpfern entgegengewirkt werden. Eine geeignete Lösung wird in der Praxis meist nur auf empirischem Wege gefunden. /21/

### 3.2.2 Schalldämpfer

Wie im Kapitel 3.1 erläutert, kann durch den Betrieb eines BHKWs maßgeblich tieffrequenter Schall abgestrahlt werden. Darüber hinaus werden durch den Betrieb des Motors aber auch Energien im mittel- und hochfrequenten Bereich erzeugt. Das alleinige Vorhandensein von Rohrleitungen, die dann in den Abgaskamin münden, reicht bei den hohen Schallleistungspegeln der Verbrennungsmotoren deshalb nicht aus, um die entstehenden Spektralanteile, effektiv zu dämpfen. Deshalb ist es nötig in die Abgasstrecken von BHKWs Schalldämpfer einzubauen.

Prinzipiell kann die allgemeine Wirkung eines Schalldämpfers folgendermaßen beschrieben werden:

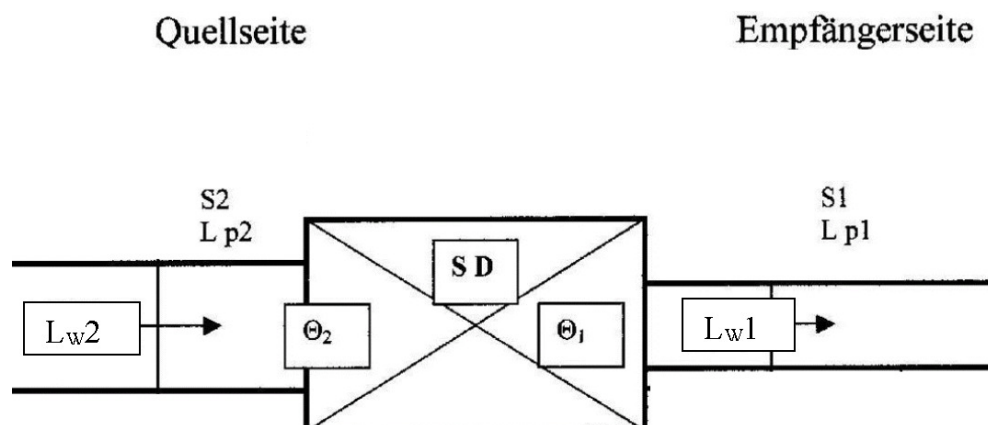


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Schalldämpferwirkung /9/

Der vom Verbrennungsmotor erzeugte und durch die Rohrleitungen weitergeleitete Schallleistungspegel  $L_{w2}$ , ruft vor dem Schalldämpfer (SD) einen bestimmten Schalldruckpegel  $L_{p2}$  auf einer bestimmten Fläche  $S_2$  hervor. Im Inneren des Schalldämpfers kommt es zur Minderung des Schallleistungspegels  $L_{w2}$  zum Schallleistungspegel  $L_{w1}$ . Die Differenz beider Größen ergibt das Durchgangsdämpfungsmaß  $D_{ts}$ :

$$D_{ts} = L_{w2} - L_{w1} \quad [\text{GL 3.5}]$$

Demzufolge beschreibt das Durchgangsdämpfungsmaß die durch den Schalldämpfer reduzierte Schallleistung. Ebenfalls von Bedeutung ist das Einfügungsdämpfungsmaß  $D_{is}$ :

$$D_{is} = L_{w1} (\text{ohne SD}) - L_{w1} (\text{mit SD}) \quad [\text{GL 3.6}]$$

Die Einfügungsdämpfung ist ein Maß für den durch Einbringen eines Schalldämpfers in den Abgasstroms reduzierten Schallleistungspegels zum Urzustand, also ohne Schalldämpfer.

Analog zu den Schallleistungspegeln verhalten sich die jeweiligen Schalldrücke:

$$D_{tps} = L_{p2} - L_{p1} \quad [\text{GL 3.7}]$$

$$D_{ips} = L_{p1} (\text{ohne SD}) - L_{p1} (\text{mit SD}) \quad [\text{GL 3.8}]$$

Hierin bedeuten:

$D_{tps}$  Durchgangs-Schalldruckpegeldifferenz

$D_{ips}$  Einfügungs-Schalldruckpegeldifferenz

### 3.2.2.1 Absorptionsschalldämpfer

Ein Absorptionsschalldämpfer gehört zum Ausrüstungsstandart der zu betrachtenden BHKWs, d.h. in den Abgasstrecken der BHKWs ist ein solcher Dämpfer „von Haus aus“ vorhanden. Ein Absorptionsschalldämpfer enthält poröse Material (z.B. Steinwolle oder Glaswolle), welches die Schallenergie in Wärmeenergie umwandelt. Die in den Dämpfer eintretenden Schallwellen werden durch Reibung am porösen Material in Wärmeenergie umgewandelt (Dissipation). Durch Mehrfachreflexionen an den Wänden des Dämpfers wird die dämpfende Wirkung noch verstärkt. Das typische Wirkungsspektrum eines Absorptionsschalldämpfers kann folgendermaßen beschrieben werden:

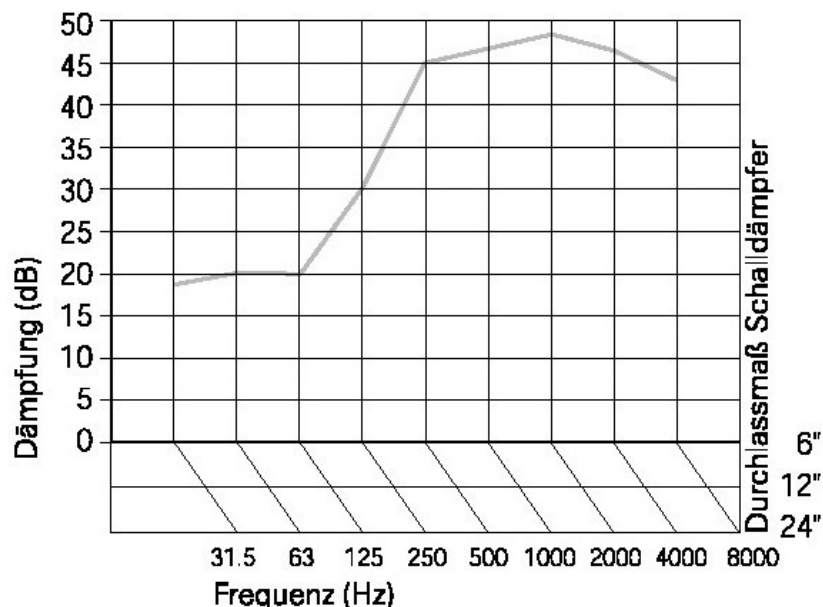


Abbildung 10: Dämpfungsspektrum eines Absorptionsschalldämpfers /15/

Aus der Abbildung ist zu erkennen, dass der Dämpfer erst im mittleren Frequenzbereich seine optimale, breitbandige Wirkung besitzt. Es werden dabei Dämpfungen von bis zu  $D = 48$  dB erreicht. Im tieffrequenten Bereich hingegen werden Dämpfungen von maximal  $D = 20$  dB erreicht. Die durch den Betrieb des BHKWs dominant erzeugten tieffrequenten Schallwellen werden also durch einen solchen Absorptionsschalldämpfer nur sehr schlecht gedämpft. Für eine Wirkung in diesem Frequenzbereich wären große Auskleidungstiefen mit porösem Material notwendig, um die Schallenergie der großen Wellenlängen in Wärmeenergie umzuwandeln. Hierfür ist das dann notwendige Raumangebot in

den Gebäuden bzw. Containern, zur Integration solcher großvolumigen Absorptionsschalldämpfer in den Abgasstrom aber nicht vorhanden. /8/

Das Problem der geringen Dämpfung tieffrequenten Schalls durch den Absorptionsschalldämpfer wird noch durch die Besonderheiten der tieffrequenten Schallausbreitung in den Rohren und im Abgaskamin verstärkt, was folgende Abbildung aufzeigt:

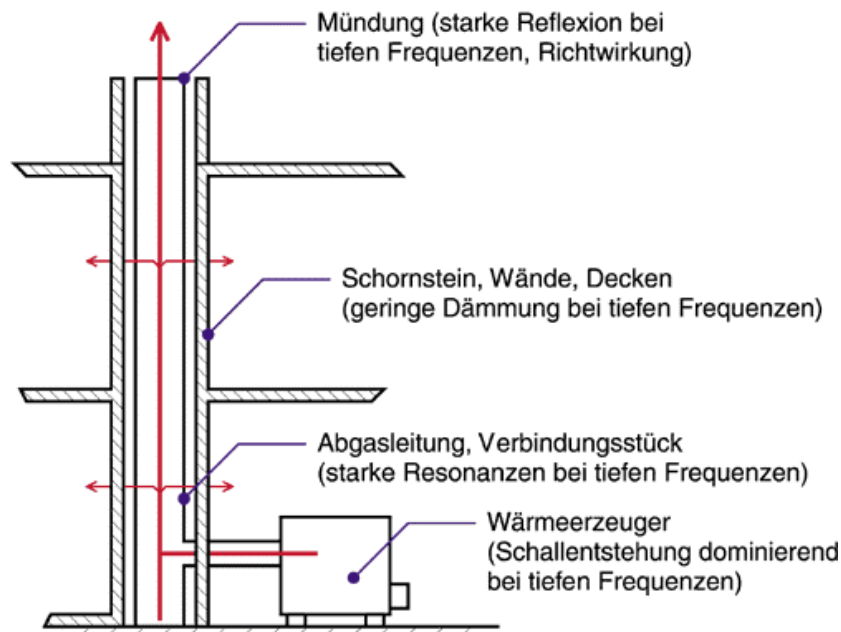


Abbildung 11: Schematische Darstellung zur Ausbreitung von Abgasgeräuschen einer Heizungsanlage /7/, /21/

Entsprechend der Abbildung können also die tieffrequenten Spektralanteile durch Resonanzanregungen in den Rohrleitungen noch verstärkt werden. Die geringe Dämpfung der tieffrequenten Schallanteile durch den Absorptionsschalldämpfer von maximal  $D = 20$  dB ist in so einem Falle nicht ausreichend. Die dominant tieffrequenten Spektralanteile können durch geringe Dämpfung so fast ungehindert in die Atmosphäre abgestrahlt werden. Um diesem Problem zu entgegen, ist es von enormer Bedeutung, in die Abgasstrecken von BHKWs zu den zur Standartausrüstung des BHKWs gehörigen Absorptionsschalldämpfern **zusätzliche Resonanzschalldämpfer** einzubauen.

### 3.2.2.2 Resonanzschalldämpfer

Da durch den Betrieb des BHKWs dominante Erregerfrequenzen besonders im tieffrequenten Bereich erzeugt werden (siehe Kap. 3.1), ist es sinnvoll speziell diese tonalen Spektralanteile zu dämpfen. Erfahrungen zeigen, dass das Einfügen eines **Resonanzschalldämpfers** in den Abgasstrom die einfachste und zudem effektivste Methode darstellt.

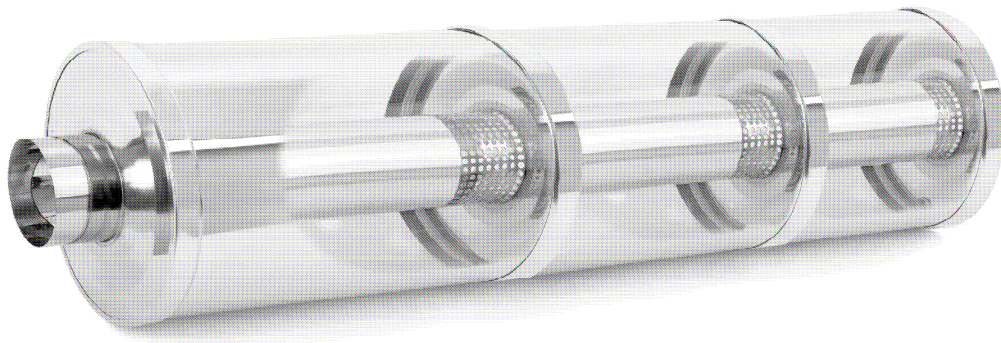


Abbildung 12: Dreikammer-Tiefton-Schalldämpfer /16/

Ein solcher Schalldämpfer wird speziell auf die zu dämpfenden, dominanten Spektralanteile ausgelegt. Er wirkt also im Gegensatz zum Absorptionsschalldämpfer schmalbandig. Seine Wirkungsweise beruht auf der destruktiven Interferenz (siehe Anlage 5). Dabei werden die in die Resonatorkammern hineinlaufenden Schallwellen durch phasenverschobenen, rücklaufende Wellen gleicher Frequenz ausgelöscht. Schematisch kann die Wirkung des Dämpfers folgendermaßen beschrieben werden.

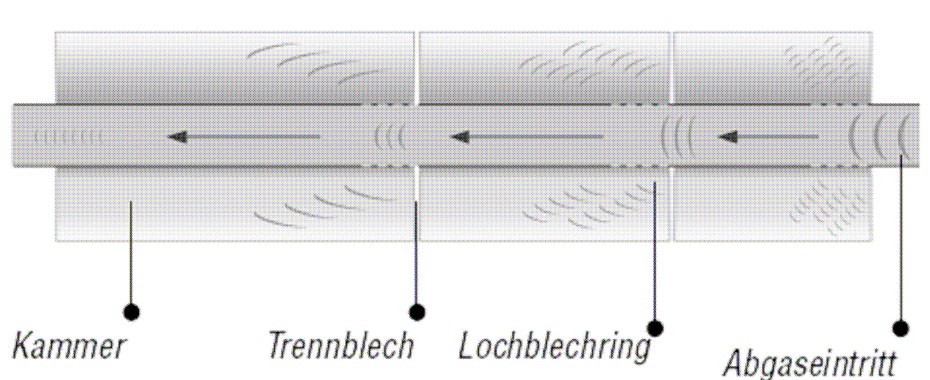


Abbildung 13: Schematischer Aufbau eines Dreikammer-Tiefton-Schalldämpfers /16/



Die in Reihe geschalteten, unterschiedlich großen Kammern erhöhen die Wirkung des Resonanzschalldämpfers, da in jeder Kammer ein bestimmter Frequenzbereich optimal gefiltert wird. Je nach Dimensionierung jeweiligen Kammern kann so der Schalldämpfer auf eine selektiv zu dämpfende Frequenz z.B. die Terzfrequenz bei  $f_{\text{Terz}} = 80 \text{ Hz}$  ausgelegt werden, wobei maximale Einfügungsdämpfungen von bis zu  $D = 30 \text{ dB}$  erreicht werden können. Die maximale Minderung des Summenpegels liegt bei  $D = 25 \text{ dB}$ . Als positiv kann weiterhin der geringe Druckverlust im Abgasstrom, der durch die Integration des Schalldämpfers entsteht, sowie die hohe Temperatur- und Druckverträglichkeit genannt werden.

### **Fazit:**

Mit einem auf das Emissionsspektrum des Verbrennungsmotors angepassten **Systems aus Absorptionsschalldämpfer und Resonanzschalldämpfer** kann eine effektive Bedämpfung aller Frequenzen erfolgen.

### **3.3 Schallabstrahlung des Abgaskamins**

Beim Schallaustritt an der Kaminmündung wird ein Teil der Schallwellen wieder zurück in den Kamin reflektiert. Dies ist mit dem abrupten Übergang von Rohr- zur Freifeldausbreitung und der damit verbundenen Querschnittsänderung zu begründen. Für tieffrequente Schallanteile ist diese Mündungsreflexion dabei stärker ausgeprägt als bei hochfrequenten Spektralanteilen (siehe Abbildung 13). /21/

Neben dieser frequenzabhängigen Mündungsreflexion spielt die Richtcharakteristik des Abgaskamins ebenfalls eine große Rolle. Die Richtcharakteristik beschreibt die Art der Schallabstrahlung einer Schallquelle in Abhängigkeit vom abgestrahlten Raumwinkel und der Frequenz für einen konstanten Abstand von der Quelle.

Für eine Abgasmündung lässt sich diese Eigenschaft einer Schallquelle folgendermaßen grafisch darstellen (die  $0^\circ$ -Messkurve bedeutet, dass senkrecht zur Gas- bzw. Schallausbreitungsrichtung gemessen wurde):

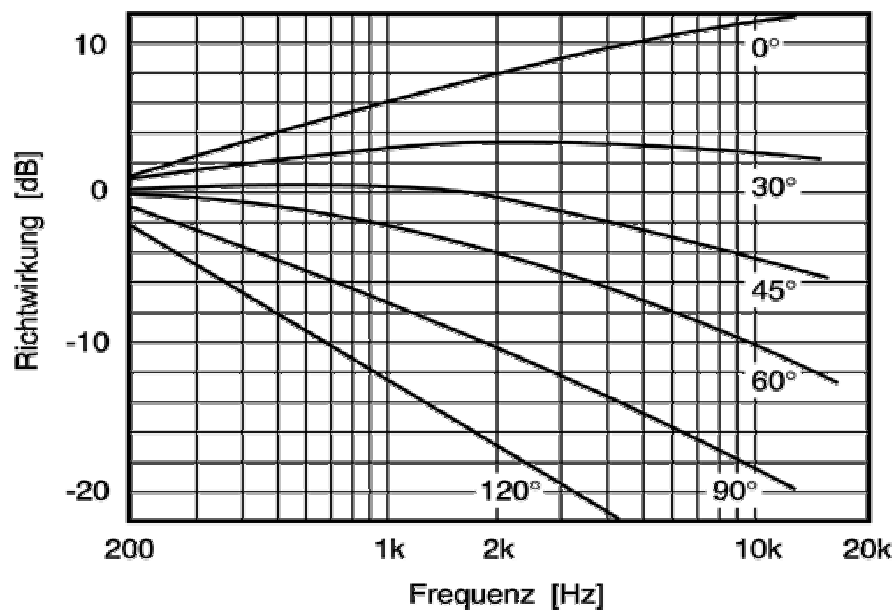


Abbildung 14: Richtwirkung DI der Schallabstrahlung einer Schornstein  
-mündung bei einer Nennweite von 340 mm /7/, /21/

Aus der Abbildung lässt sich erkennen, dass tieffrequenterer Spektralanteile fast ungerichtet, und hochfrequente Schallanteile von der Kaminmündung stark gerichtet abgestrahlt werden. Leider gibt die Abbildung keinen direkten Aufschluss auf die zu erwartende Richtwirkung für Frequenzen von  $f < 100$  Hz. Jedoch kann anhand des Verlaufes der Messkurven eine Abschätzung für den Bereich des tieffrequenten Schalls dahingehend getroffen werden, dass Frequenzen von  $f < 200$  Hz noch ungerichteter durch den Abgaskamin emittiert werden.

Diese stark frequenzabhängige Richtwirkung ist auf die unterschiedliche Beugung der jeweiligen Frequenzanteile zurückzuführen. Schallwellen werden umso besser gebeugt, je größer die Wellenlänge  $\lambda$  zum auftreffenden Hindernis ist. Schall tiefer Frequenzen wird also bei gleicher Abmessung des Hindernisses besser gebeugt als Schall hoher Frequenzen:



Abbildung 15: Beugung hoher Frequenzen und tiefer Frequenzen /10/



Für die Schallabstrahlung am Abgaskamin eines BHKWs sind jedoch nur die tieffrequenten Schallanteile von Bedeutung, da die mittel- und hochfrequenten Spektralanteile durch den Absorptionsschalldämpfer gut bedämpft werden. Entsprechend der zu erwartenden geringen Richtwirkung der tieffrequenten Schallanteile, kann die Schallabstrahlung am Abgaskamin als weitgehend kugelförmig charakterisiert werden.



Abbildung 16: Kugelwellenausbreitung an der Abgasöffnung eines BHKWs, für tiefe Frequenzen

Für die folgenden theoretischen Betrachtungen soll für die Schallabstrahlung des Abgaskamins ein Kugelstrahler nullter Ordnung (Monopol) zum Ansatz gebracht werden. Die Kugel, deren Ausdehnung als klein gegenüber der abgestrahlten Wellenlängen anzusehen ist, wird dabei in die Mitte des Abgaskamins (horizontal zur Öffnung) gelegt. Die Kugelwellenabstrahlung entsteht dabei durch radialsymmetrisches oszillieren der Kugeloberfläche in einem ungestörten, unendlich ausgedehnten Medium. /5/

Bei der Schallabstrahlung einer Kugelwelle wird zwischen dem Nahfeld und dem Fernfeld unterschieden. Von besonderer Bedeutung ist hierbei der Term  $kr$ , welcher folgendermaßen ausgedrückt werden kann:

$$kr = \frac{2\pi \cdot f}{c} r = \frac{2\pi \cdot r}{\lambda} \quad [\text{GL 3.9}]$$

Die Unterscheidung von Nah- und Fernfeld ist also abhängig von der Wellenlänge  $\lambda$  (definiert über die Frequenz  $f$  und die Schallgeschwindigkeit  $c$ ) und dem Abstand von der Quelle  $r$ .

Ein Nahfeld liegt dann vor, wenn die Bedingung  $kr \ll 1$  erfüllt ist. Für die Bedingung  $kr \gg 1$  liegt dagegen ein Fernfeld vor. Für den konkreten Fall einer vom Abgaskamin des BHKWs emittierten **75-Hz-Schallwelle** ergibt sich dabei folgende Grenze zwischen Nah- und Fernfeld:

$$kr = \frac{2\pi \cdot f}{c} r \quad \rightarrow \quad 1 = \frac{2\pi \cdot 75s}{342m \cdot s} r \quad \rightarrow \quad r = \frac{342m}{2\pi \cdot 75} = \underline{\underline{0,73m}} \quad [\text{GL 3.10}]$$

Der Bereich unter  $r < 0,73 \text{ m}$  ist theoretisch als Nahbereich des Kamins anzusehen. Der Schalldruckpegel klingt in diesen Bereich sehr rapide ab, was auf das Vorhandensein von Wirk- und Blindleistung zurückzuführen ist. Die Blindleistung wird nicht in das Fernfeld abgestrahlt. Vielmehr werden die Luftteilchen, aufgrund einer Phasenverschiebung von  $\varphi = 90^\circ$  zwischen Schalldruck und Schallschnelle auf der Kugeloberfläche, in geringen Abstand zur Quelle „hin- und hergepumpt“.

Ab  $r > 0,73 \text{ m}$  kann von dem Fernbereich, im Bezug auf die 75-Hz-Schallwelle gesprochen werden. Es ist nur noch Wirkleistung vorhanden, die in Form von Schallwellen bis zum Empfänger (z.B. Immissionsort) transportiert wird. /11/

Bezüglich der im Nahbereich des Abgaskamins durchzuführenden Emissionsmessungen haben diese Wirkmechanismen also einen entscheidenden Einfluss auf die sich ergebenden Messergebnisse und Schlussfolgerungen.

Weiterhin soll kurz die Berechnung des Schallleistungspegels am Abgaskamin des BHKWs beschrieben werden. Für dessen Berechnung ist es nötig einen Schalldruckpegel  $L_p$  in definiertem Abstand  $s$  von der Mitte des Abgaskamins zu

messen. Mit diesen Kenndaten kann der Schallleistungspegel folgendermaßen berechnet werden:

$$L_w = L_p + 20 \cdot \log\left(\frac{s}{s_0}\right) dB + 11 dB - K_0 \quad [\text{GL 3.10}]$$

Da die Schallwellen der zu betrachtenden Abgaskamine von BHKWs als Kugelwellen vereinfacht gesehen in den Halbraum abgestrahlt werden, ergibt sich das Raumwinkelmaß zu  $K_0 = 3 \text{ dB}$  (weitere Ausführungen hierzu siehe Punkt 8, Anstrich 2).

Damit ergibt sich die folgende Vereinfachung:

$$L_w = L_p + 20 \cdot \log\left(\frac{s}{s_0}\right) dB + 8 dB \quad [\text{GL 3.11}]$$

Zur besseren Verständlichkeit der Berechnung des Schallleistungspegels soll das folgende **Rechenbeispiel** dienen:

In einem Abstand von  $s = 1 \text{ m}$  von der Kaminmitte wurde für die Terzmittenfrequenz bei  $f_{\text{Terz}} = 80 \text{ Hz}$  ein Schalldruckpegel von  $L_{p,80\text{Hz},\text{lin}} = 85 \text{ dB}$  gemessen. Werden diese Werte in GL 3.11 eingesetzt ergibt sich folgender Schallleistungspegel für die Terzmittenfrequenz bei  $f_{\text{Terz}} = 80 \text{ Hz}$ :

$$L_{w,\text{Terz},80\text{Hz}} = 85 \text{ dB} + 20 \cdot \log\left(\frac{1\text{m}}{1\text{m}}\right) dB + 8 \text{ dB}$$

$$L_{w,\text{Terz},80\text{Hz}} = 85 \text{ dB} + 8 \text{ dB} = \underline{\underline{93 \text{ dB}}}$$

Die Formel GL 3.11 kann dabei für alle tieffrequenten Terzmittenfrequenzen sowie für den A-bewerteten Gesamtschallleistungspegel  $L_{\text{WA}}$  des Abgaskamins verwendet werden. Im Falle der tieffrequenten Schallabstrahlung von Abgaskaminen sollte jedoch der Messabstand nicht mehr als  $s = 2 \text{ m}$  von der Mitte des Abgaskamins betragen (siehe Ausführungen im Punkt 5 und 8).

### 3.4 Tieffrequente Schallausbreitung im Freien

Wie im Vorkapitel beschrieben, breiten sich die tieffrequenten Schallwellen in alle Raumrichtungen mit fast gleicher Intensität aus. Für diese Kugelwellen beträgt die Minderung des Schalldruckpegels 6 dB pro Abstandsverdopplung (siehe Anlage 5a). Diese Minderung von 6 dB resultiert dabei nur aus der Charakteristik der Schall-abstrahlung von der Quelle, sie ist theoretisch unabhängig von der Frequenz. Dieser theoretische Schalldruckpegelabfall von „**6 dB pro Abstandsverdopplung**“ wird in den Abbildungen im Punkt 4 mit berücksichtigt.

Eine weitere Eigenschaft der tieffrequenten Schallausbreitung (für  $f < 90 \text{ Hz}$ ) stellt die Reflexion der langen Schallwellen ( $\lambda > 3,8\text{m}$ ) am Boden und die im Gegensatz zu höheren Frequenzen (kleine Wellenlängen) starke punktuelle Auslöschung oder Verstärkung des Schalldruckpegels am Ort des Empfängers dar:

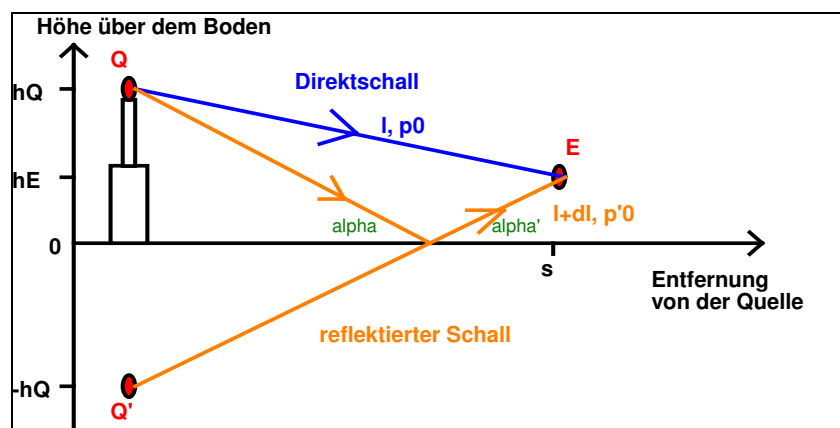


Abbildung 17: Reflexion von Schallwellen am Boden /1/

Es ist zu erkennen, dass sich neben dem Direktschall, der von der Quelle Q ausgeht, noch ein weiterer Schallstrahl durch die Reflexion am Boden ergibt, der den Empfänger E erreicht. Überlagern sich der Direktschall und der reflektierte Schall, kann es zu örtlichen Verstärkungen (von maximal  $\Delta L = 6 \text{ dB}$ ) bzw. zu Verringerungen des Schallpegels – abhängig vom Phasenunterschied der beiden aufeinandertreffenden Wellenfronten - besonders bei den zu betrachtenden, tieffrequenten Schallwellen kommen. /1/

Es noch sei bemerkt, dass es sich bei den Effekten um eine kohärente Überlagerung handelt, da die Schallwellen der direkt einfallenden und am Boden reflektierten Welle von ein und derselben Quelle emittiert werden. Dabei können die schon angesprochenen Verstärkungen von bis zu  $\Delta L = 6 \text{ dB}$  an bestimmten Punkten auftreten.

Diese Überlagerung berücksichtigt folgende Gleichung:

$$L = L_w - 8\text{dB} - 20\lg\left(\frac{l}{l_0}\right)\text{dB} + 20\lg\left(\frac{2p_0\left(\frac{l}{l+\Delta l}\right)^* \left|\cos\frac{\pi \cdot \Delta l_B}{\lambda}\right|}{p_0}\right)\text{dB} \quad [\text{GL 3.12}]$$

Mit der Gleichung kann ein Schalldruckpegel an einem bestimmten Punkt im Raum unter Berücksichtigung des Interferenzeffektes durch Bodenreflexion berechnet werden. Die Gleichung besteht aus 2 Haupttermen. Der erste beider Terme entspringt dem normalen Abstandsgesetz (Kenngrößen hierfür sind der Schallleistungspegel der Quelle  $L_w$  und der Abstand von Quelle und Empfänger  $s$  ( $s_0 = 1\text{m}$ )). Der zweite Term berücksichtigt den Laufzeitunterschied der Schallwellen des Direktschalls und des am Boden reflektierten Schalls einer bestimmten Frequenz (siehe Abbildung 14). Die Kenngrößen für diesen Term sind die Wellenlänge  $\lambda$  (der zu betrachtenden Frequenz) und der Laufzeitunterschied  $\Delta l_B$ , welcher folgendermaßen berechnet werden kann:

$$\Delta l_B = \sqrt{((h_Q + h_E)^2 + s^2)} - \sqrt{((h_Q - h_E)^2 + s^2)} \quad [\text{GL 3.13}]$$

Dieser genannte theoretische Ansatz wurde schon im Vorfeld der Diplomarbeit in ein entsprechendes Berechnungsprogramm implementiert. Die genannten Zusammenhänge der tieffrequenten Schallausbreitung werden in den Abbildungen im Punkt 4 mittels einer theoretischen Kurve als „**Interferenz durch Bodenreflexion**“ berücksichtigt. /1/

Wird weiterhin die Schallausbreitung tieffrequenter Schallwellen, emittiert durch den Abgaskamin, betrachtet, so ergeben sich neben den Reflexionen der Schallwellen am Boden auch Reflexionen an den Fassaden nahe gelegener Gebäude. Werden tieffrequente Spektralanteile an diesen Hindernissen

reflektiert, so entstehen ortsabhängig ebenfalls Verstärkungen bzw. Abschwächungen des Schalldruckpegels. Dies ist auf konstruktive bzw. destruktive Interferenz der Schallwellen zurückzuführen. Überlagern sich zwei Schallwellen mit gleicher Phase und Amplitude, so resultiert eine Schallwelle mit gleicher Frequenz und doppelter Amplitude (konstruktive Interferenz). Bei destruktiver Interferenz hingegen löschen sich die beiden Wellen, bedingt durch einen Phasenunterschied von  $180^\circ$ , untereinander aus (siehe Anlage 5 b).

Ein Interferenzmuster, wie es durch Reflexion an einer Gebäudefassade entsteht, sei in der folgenden Abbildung grafisch dargestellt:

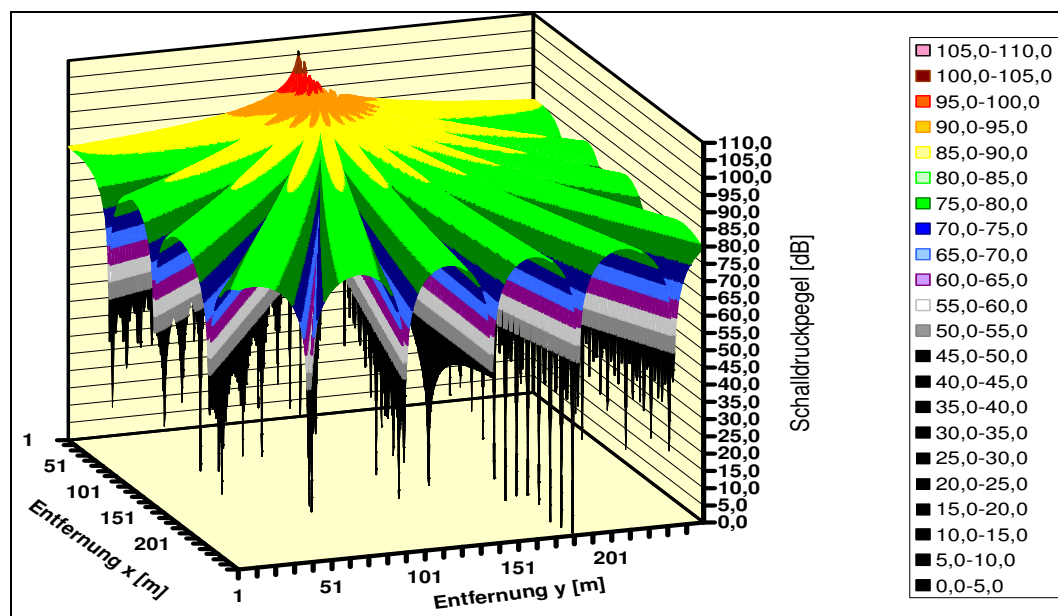


Abbildung 18: Schallausbreitung einer Punktquelle mit Wandreflexion (Wand in 1m Abstand) /1/

Die Grafik beschreibt die Ausbreitung einer durch eine Punktquelle emittierten tieffrequenten 75-Hz-Schallwelle ( $L_W = 108$  dB) mit Reflexion an einer Begrenzungsfläche (in einem Meter Abstand von der Punktquelle). Im Gegensatz zur Schallausbreitung ohne Reflexion (siehe Anlage 5a) entstehen interferenzbedingt in den verschiedenen Raumrichtungen Verstärkungen bzw. Verringerungen des Schalldruckpegels.

Um dieses Phänomen zu untersuchen, wurden im Fernfeld von BHKWs Schallpegelmessungen, im Rahmen einer vorliegenden Diplomarbeit /1/, in verschiedene Raumrichtungen für verschiedene Messhöhen durchgeführt. Die

Auswertung dieser Ergebnisse konnte die Existenz dieser in Abb. 18 dargestellten, theoretisch zu erwartenden „lauten“ und „leisen“ Richtungen beweisen:

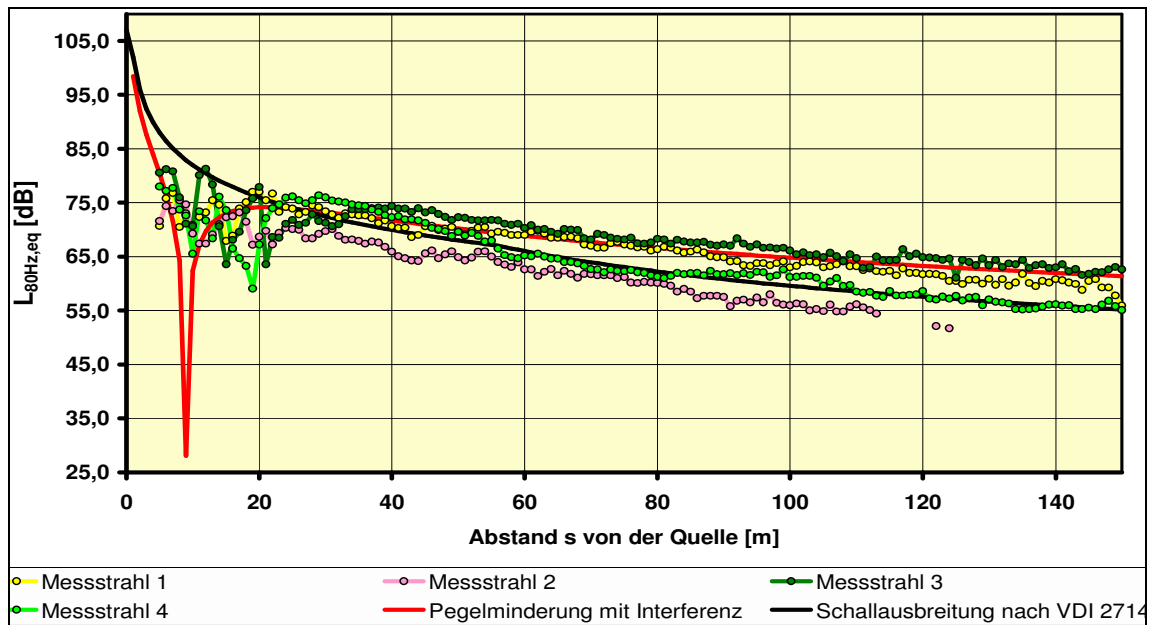


Abbildung 19: Messwerte ermittelt entlang 4 MS in 1,5 m Höhe /1/

Es ist zu erkennen, dass die Messwerte von  $5 < s < 30$  m teilweise extremen Pegelschwankungen unterliegen. Ab  $s = 30$  m Abstand „beruhigen“ sich die Kurvenverläufe der einzelnen MS, es ergeben sich jedoch teilweise enorme Pegelunterschiede zwischen den „lauten“ (MS 3) und „leisen“ (MS 2) Richtungen von  $\Delta L_{\max} = 10$  dB.

Werden die Messwerte entlang eines MS für verschiedene Höhen betrachtet, kann sich folgender Zusammenhang ergeben:

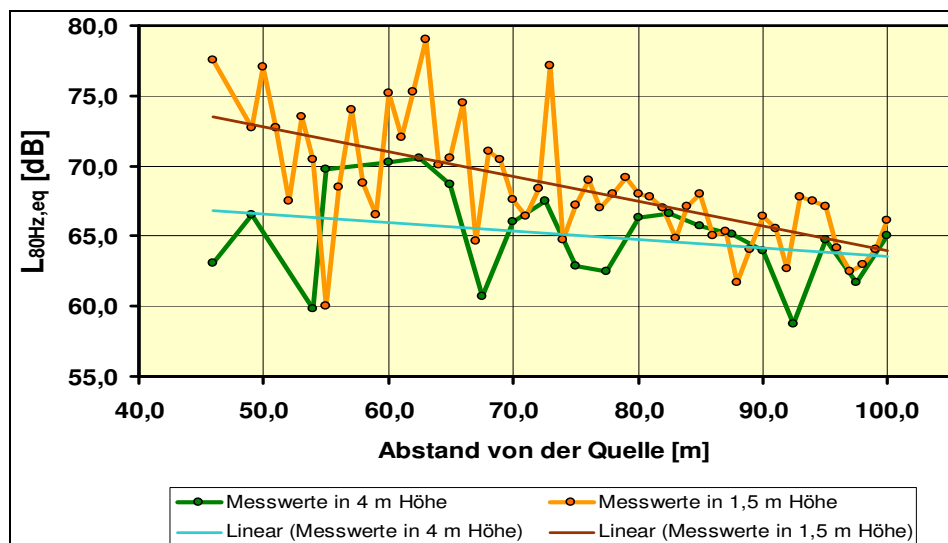


Abbildung 20: Messwerte ermittelt entlang eines MS in 1,5 & 4 m Höhe /1/

Es ist zu erkennen, dass die Messwerte im gesamten Messbereich in beiden Messhöhen extrem streuen. Besonders hohe Pegelunterschiede ergeben sich für die Messhöhe von  $h = 1,5$  m. Erst ab einem Bereich oberhalb  $s = 60$  m nähern sich die Messwerte der unterschiedlichen Höhen einander an.

Die beiden Abbildungen 19 & 20 kennzeichnen aufgrund der teilweise starken Pegelschwankungen durch die auftretenden Interferenzerscheinungen für die unterschiedlichen Messhöhen und Messstrahlen damit das Problem der fehlerhaften Nachweisführung des realen Emissionsverhalten des Abgaskamins im Fernbereich.

Deshalb ergibt sich für die schalltechnischen Untersuchungen der vorliegenden Diplomarbeit nun die Fragestellung, inwieweit diese Interferenzerscheinungen auch den Nahbereich der zu untersuchenden Kaminmündung beeinflussen und inwiefern auf Grundlage dieser Ergebnisse auf das tatsächliche Emissionsverhalten des Abgaskamins, im Bezug auf die Einhaltung der in den noch zu formulierenden Nebenbestimmungen geforderten Maximal-emission(en), geschlussfolgert werden kann.



### 3.5 Schalleintrag tiefer Frequenzen in Gebäude

Tiefe Frequenzen können von außerhalb des Gebäudes relativ ungehindert in die sich darin befindlichen Räume eindringen. Theoretisch lässt sich der Übergang der Schallwellen vom Freifeld vor dem Haus in den Wohnraum folgendermaßen schematisch beschreiben:

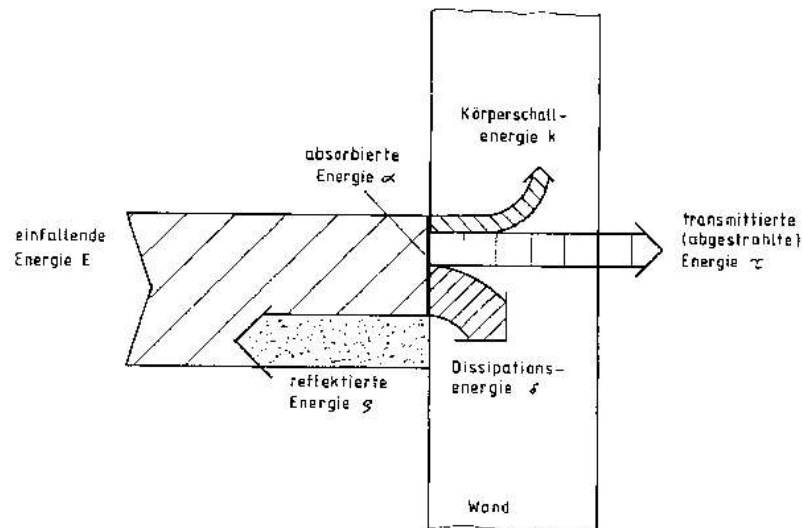


Abbildung 21: Schallenergiebilanz an einer Wand /5/

Diese Schallenergiebilanz wird meist in Form der Leistungsbilanz ausgedrückt:

$$P_E = P_\rho + P_\delta + P_\tau + P_\kappa \quad [\text{GL 3.13}]$$

Die einfallenden tieffrequenten Schallwellen mit der Energie E treffen auf eine Trennfläche, in der Abbildung als Wand z.B. eines Wohnhauses dargestellt. Von den auf die Wand auftreffenden tieffrequenten Schallwellen wird ein Teil der Energie reflektiert (reflektierte Energie  $\rho$ ). Die restliche Energie wird durch die Wand absorbiert (absorbierte Energie  $\alpha$ ). Der absorbierte Anteil wird in der Wand in Dissipationsenergie  $\delta$ , also Wärmeenergie und Körperschallenergie  $\kappa$ , umgewandelt. Die noch verbleibende, transmittierte Energie  $\tau$  wird in den Wohnraum abgestrahlt. /5/

In der Praxis ergeben sich bezüglich des Schalleintrags in Gebäude jedoch Unterschiede. So werden die tiefen Frequenzen besonders durch die **Fenster** in einen Wohnraum eingetragen, was auf deren **Tiefpasswirkung**

zurückzuführen ist. Sie stellen demnach das schwächste Bauteil bezüglich des tieffrequenten (und auch des mittel- und hochfrequenten) Schalleintrags in Wohnräume dar, da mehr Schallenergie vom Außenbereich in das Gebäudeinnere dringt, als dies z.B. bei einer reinen massiven Außenwand der Fall ist. Für hohe Schalldruckpegel tiefer Frequenzen vor dem Wohngebäude sind damit schon Probleme in den schutzbedürftigen Wohnräumen vorprogrammiert. /3/

Als nachteilig kann weiterhin sich der vor einem Gebäude aufbauende **Druckstau** genannt werden. Ist die Höhe des Wohnhauses mit einem ganzzahligen Vielfachen der halben Wellenlänge der einwirkenden tieffrequenten Schallwellen identisch, so tritt dieser Druckstau vor Gebäuden auf. Das hat zur Folge, dass die vor der Hausfassade gemessenen Schalldruckpegel im Gegensatz zu Messungen neben dem Haus um bis zu  $\Delta L = 10 \text{ dB}$  höher sein können. /3/

Ein weiteres Problem stellen die für Wohnräume gängigen Raumabmessungen dar. Beispielsweise beträgt die Wellenlänge bei einer Frequenz von  $f = 75 \text{ Hz}$ ,  $\lambda_{75\text{Hz}} \approx 4,6 \text{ m}$ . Für den Fall, dass ein Raum genau die Abmessung der Wellenlänge  $\lambda_{75\text{Hz}}$  bzw. der halben Wellenlänge  $\lambda/2_{75\text{Hz}} = 2,3 \text{ m}$  besitzt, bilden sich im Wohnraum **stehende Wellen** aus. Für diesen Spezialfall wird die Pegelabnahme vor dem Fenster im Vergleich zum Innenraum der Wohnung (am ungünstigsten Messort) sehr gering. /3/

Im Rahmen der Diplomarbeit wurde der Schalleintrag tieffrequenten Schalls in Wohnräume, basierend auf der Messung und Bewertung nach der DIN 45680 /11/, über die Fenster untersucht. Die Messergebnisse können dem Punkt 4.7 entnommen werden.

## 4 Durchführung der Messungen

Um aussagekräftige Messergebnisse zu erhalten, war es notwendig, möglichst viele analoge Messungen an Blockheizkraftwerken durchzuführen. So wurden im Zeitraum von Mai 2009 bis August 2009 Messungen an insgesamt vier BHKWs durchgeführt. Vorherige Absprachen mit den Betreibern der Anlagen waren notwendig, um den für die akustischen Messungen optimalen Betriebszustand (Volllastbetrieb des Verbrennungsmotors) herzustellen. Weitere Faktoren wie der Einfluss des Windes und Witterungsbedingungen wurden im Vorfeld der Messungen ebenfalls mit berücksichtigt.

### 4.1 Erarbeitung und Erläuterung des Messverfahrens

Um Erkenntnisse über die Ortsabhängigkeit des Schalldruckpegels der über den Abgaskamin des BHKWs emittierten tieffrequenten Terzfrequenzen zu erhalten, war es nötig, entlang verschiedener Richtungen und unterschiedlicher Höhen zu messen. Die Messpunkte wurden entlang von Messstrahlen bis zu einem Abstand von  $s = 5 \text{ m}$  ( $\lambda_{75\text{Hz}} \approx 4,6\text{m}$ ) vom Abgaskamin in  $0,25 \text{ m}$  Schritten gewählt, um Aussagen über die eventuell real auftretenden Extremwerte bei  $\lambda/4_{75\text{Hz}} = 1,15 \text{ m}$  zu treffen. Für den Bereich von  $s = 5 \text{ m}$  bis zum Ende des Messstrahls (dessen Ende nach den örtlichen Gegebenheiten variierte) wurden Messungen in  $0,5 \text{ m}$  Abständen durchgeführt. Die Ortsabhängigkeit des Schalldruckpegels konnte so exakt bestimmt werden – vor allem in Bezug auf die zu erwartenden Interferenzeffekte der tieffrequenten Schallwellen durch Bodenreflexion bzw. Reflexion an Gebäudefassaden in der näheren Umgebung des Abgaskamins.

Ebenfalls war es wichtig, Aussagen über die Richtcharakteristik, speziell im Nahbereich des Abgaskamins  $s < 2 \text{ m}$ , treffen zu können. Deshalb wurden die zwei bzw. drei Messstrahlen horizontal in unterschiedlichen Winkeln zum Abgaskamin gelegt. Vorliegende messtechnische Untersuchungen an den Abgaskaminen von BHKWs kamen zu dem Ergebnis, dass die optimale Messhöhe an den Abgaskaminen waagerecht zur Kaminmündung verläuft. /12/ Dies wurde bei den durchgeführten Messungen mit berücksichtigt. Deshalb

musste die Auswahl der auszumessenden BHKWs auch nach dem Kriterium der guten Erreichbarkeit des Abgaskamins ( $h_{\text{Stativ}} = 12 \text{ m}$  – dies entspricht der maximal auszufahrenden Höhe des zum Einsatz kommenden Stativs) getroffen werden. Dementsprechend konnten nur BHKWs mit einem Abgaskamin von  $h_{\text{Kamin}} = 12 \text{ m}$  ausgemessen werden.

Zu enge Bebauung um das BHKW durch weitere dem Betriebsgelände zugehörige Gebäude war in Anbetracht der in unterschiedlichen Richtungen um den Abgaskamin zu legenden Messstrahlen ebenfalls unvorteilhaft. Deshalb wurden durch Gespräche mit den Anlagenbetreibern bzw. durch Überprüfungen von Luftbildern (mittels Google Earth) bzw. vorliegenden Gutachten ungeeignete Anlagen im Vorfeld ausgeschlossen.

Neben den akustischen Untersuchungen der am wesentlichsten tieffrequenten Schall emittierenden Quelle „Abgaskamin“ wurden auch Schallpegelmessungen an den im Punkt 1.3 aufgeführten Teilschallquellen von BHKWs durchgeführt. Eine Auswertung bezüglich dieser Quellen wird in dieser Diplomarbeit jedoch nicht vorgenommen, da dies den Rahmen der Arbeit sprengen würde (zumal die tieffrequenten Schallenergien dieser Quellen eher gering im Vergleich zum Abgaskamin sind). Beispielhaft werden jedoch in den den BHKWs zugehörigen Anlagen 6 bis 9 Emissionsspektren mancher Quellen aufgezeigt.

Um den Ablauf der Messungen zu optimieren, wurde ein individuelles Messprotokoll für jedes auszumessende BHKW erstellt (siehe Anlagen 6 bis 9). Fremdgeräusche und andere unerwünschte Einflüsse wie auffrischender Wind, dessen Frequenzanteile besonders im tieffrequenten Bereich liegen, bzw. veränderte Betriebs oder Umgebungsbedingungen fanden darin mit Berücksichtigung.

## **4.2 Messtechnik und Messparameter**

Zur Bewältigung des im Punkt 4.1 formulierten Messverfahrens war es notwendig, Messgeräte auszuwählen, die der Genauigkeitsklasse 1 zuzuordnen sind, um möglichst geringe Messfehler des Schalldruckpegels zu erhalten. Eine weitere Forderung an die Messtechnik bestand in der Fähigkeit Terzfrequenzanalysen durchzuführen. So wurde für alle Messungen die

Messgeräte Nor 121 bzw. Nor 110 der Firma Norsonic verwendet. Alle erforderlichen Parameter konnten im Vorfeld der Messung eingestellt werden und als Messsetup gespeichert werden. Neben den linearen äquivalenten Terzpegeln  $L_{Lin, Terz, eq}$  wurde eine WAV-Datei (nur für Nor 121) mit der Auflösung von  $f = 12$  kHz bzw.  $f = 48$  kHz aufgezeichnet. Damit war es möglich, im Zuge der Auswertung der Messungen FFT-Analysen an jedem Messpunkt durchzuführen. Da von den Schallquellen der Blockheizkraftwerke stets stationäre Dauergeräusche emittiert wurden, war es ausreichend für jede Messreihe eine Mittelungszeit von  $t = 15$  bzw.  $t = 20$  s (auch für die Einschwingzeit des Kondensatormikrofons war diese Messdauer ausreichend) zu wählen. Als Zeitkonstante wurde stets die Einstellung FAST gewählt.

Bevor die Mikrofone mittels Stativen auf die entsprechende Messhöhe eingestellt und entlang der Messstrahlen gemessen wurde, erfolgte die Kalibrierung des Kondensatormikrofons mit einem Schallkalibrator des Typs 1251 der Fa. Norsonic bei  $f_{Kali} = 1000$  Hz mit  $L_{Kali} = 114,0$  dB.

Der Abstand von der Kaminmitte wurde mittels eines 20 m bzw. 30 m langen Maßbandes, das sich entlang des Bodens erstreckte, für jeden Messstrahl exakt bestimmt. Die Höhe des Abgaskamins konnte durch Benutzung eines Laser-Entfernungsmessers ebenfalls genau bestimmt werden.

Mittels der Positionierung eines Referenzmesspunktes an einem vor dem Beginn der Messungen festgelegten Standort, bzw. Referenzmessungen vor und nach jeder Messreihe, konnte stets eine gleichbleibende Betriebsweise des BHKWs nachgewiesen werden.

Alle Messdaten wurden auf einer Flash-Card gespeichert und konnten im Nachgang mittels einer PC-Software auf einen Rechner übertragen werden. Die Messdaten wurden in eine Excel-Tabelle konvertiert und konnten nun mit den während der Messung protokollierten Bemerkungen abgeglichen und ausgewertet werden.

### 4.3 Langenberg

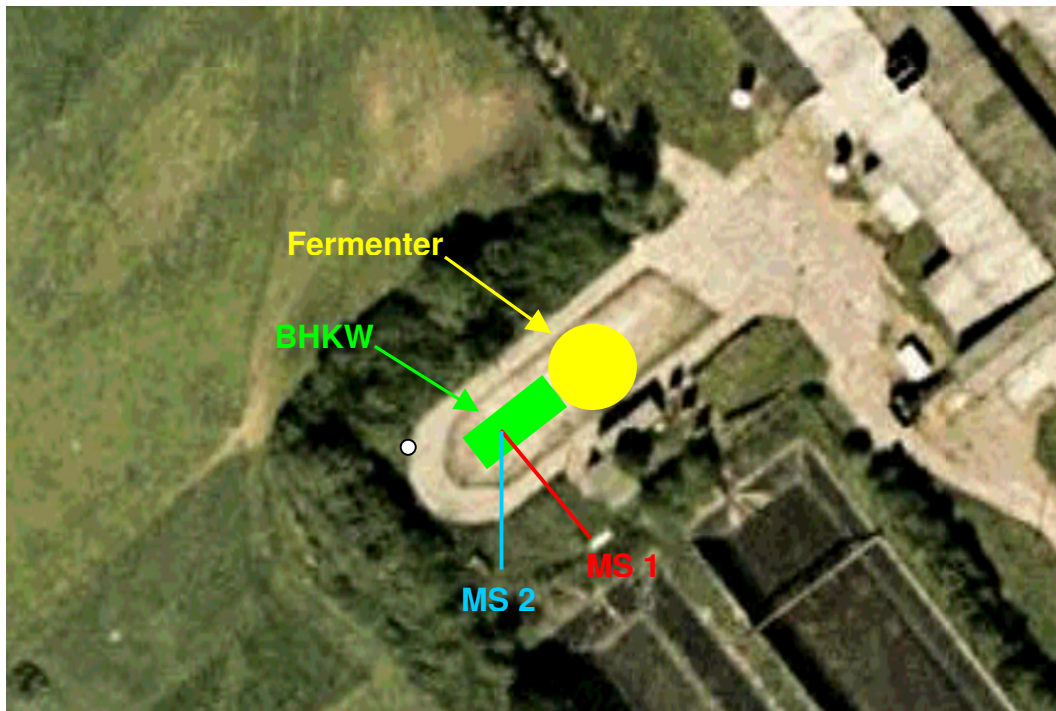


Abbildung 22: Übersichtsbild BHKW Langenberg, Maßstab ca. 1 : 7.000 /17/

#### 4.3.1 Beschreibung der Anlage

Im Jahre 2004 wurde am Standort Langenberg durch die dort ansässige Erzgebirgische Landfarm GmbH eine Biogasanlage im westlichen Bereich erbaut. Die durch die insgesamt 470 Milchkühe produzierte Gülle wird in dem Fermenter vergärt. Durch Gasleitungen wird das gewonnene Gas dem BHKW, welches in einem Container installiert ist, zugeführt. Der 6-Zylinder-MAN Reihenmotor (siehe Anlage 2a) besitzt eine Leistung von  $P_{el} = 185 \text{ kW}$  und  $P_{th} = 121 \text{ kW}$ . Das entstehende Abgas gelangt durch einen 12 m hohen Abgaskamin in die Umwelt (siehe Anlage 6).

Die akustischen Messungen wurden am 19.05.2009 von 9.00 Uhr bis 14.15 Uhr in 3 unterschiedlichen Messhöhen ( $h_1 = 1 \text{ m}$ ,  $h_2 = 4 \text{ m}$ ,  $h_3 = 12 \text{ m}$ ) und entlang zweier Messstrahlen durchgeführt (siehe Abbildung 22). Zu Beginn der Messungen wurde eine FFT-Analyse im Nahbereich des Abgaskamins durchgeführt, um Informationen über die Art der tieffrequenten Schallabstrahlung zu erhalten. Diese Schmalbandanalyse konnte eine

tieffrequente tonale Komponente bei  $f = 75$  Hz nachweisen (siehe Anlage 6). Um den Nachweis über die gleichbleibende Schallabstrahlung des Abgaskamins für den gesamten Messzeitraum zu führen, wurde ein Messgerät an einem Referenzmesspunkt positioniert (siehe weißer Punkt in Abbildung 22) und der Pegel-Zeit-Verlauf der 80-Hz-Terz aufgezeichnet.

Nach Beendigung der Messungen des Abgaskamins wurden weitere Teilschallquellen des BHKWs untersucht. Neben Innenraumpegelmessungen im Maschinenraum, Messungen der Zuluftöffnung und eines Notkühlers auf dem Dach des Containers wurden auch Untersuchungen im Nahfeld der Containerhülle durchgeführt.

Das gesamte Messprotokoll ist in der Anlage 6 zu finden.

### 4.3.2 Auswertung der Messwerte

Zunächst sollen die in  $h_1 = 1$  m und  $h_2 = 4$  m gewonnenen Messergebnisse betrachtet werden.

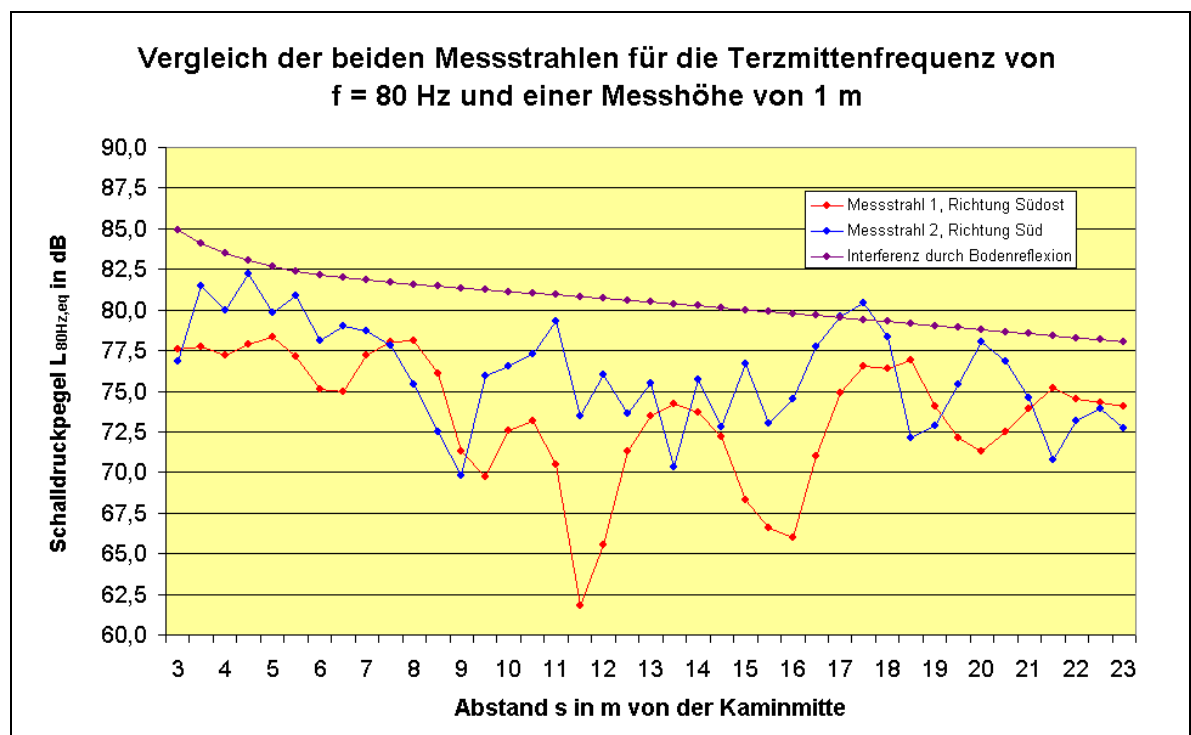


Abbildung 23: Messung Langenberg, 1m, 80 Hz

Es ist zu erkennen, dass der Terz-Schalldruckpegel  $L_{80\text{Hz},eq}$  teilweise erhebliche Schwankungen im Vergleich der beiden Messstrahlen aufweist. Für die



Messhöhe  $h_1$  differieren die Messwerte der zwei Messstrahlen um bis zu  $\Delta L = 11,7$  dB. Die theoretisch zu erwartenden Schalldruckpegel werden durch die Messwerte nicht bestätigt.

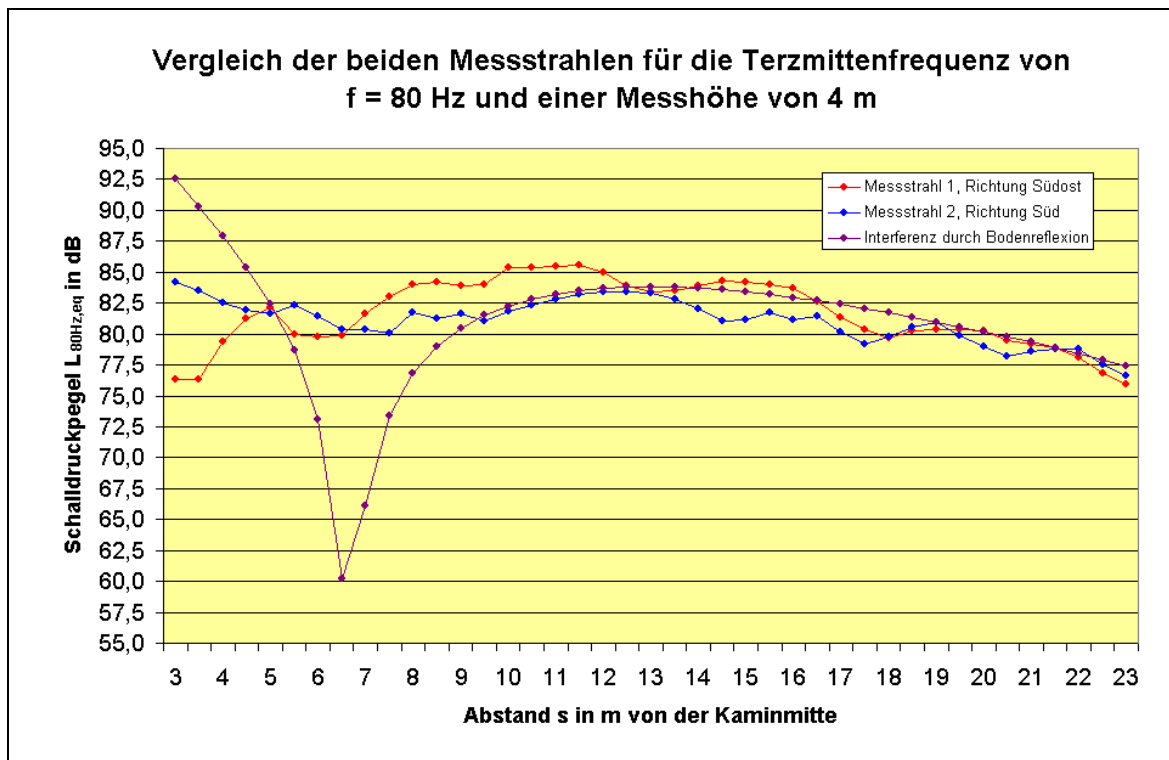


Abbildung 24: Messung Langenberg, 4m, 80 Hz

Im Vergleich dazu stimmen die Messwerte in der Messhöhe  $h_2$  ab einem Abstand von  $s = 10$  m relativ gut mit der theoretischen Kurve überein. Die Abweichung zwischen den Messstrahlen beträgt hier maximal  $\Delta L = 7,9$  dB. Diese Unterschiede in den Messergebnissen können vor allem auf den Einfluss des Bodens und auf die sich in der Nähe befindlichen Gebäude (Fermenter und ein Trafohaus) zurückgeführt werden. Durch Reflexionen der Schallwellen an diesen Hindernissen entstehen interferenzbedingt teilweise erhebliche Schwankungen der Schalldruckpegel in dem ausgewerteten Frequenzband für die beiden Messhöhen  $h_1$  und  $h_2$ . Es erscheint sinnvoll, diese Messhöhen in den folgenden Schallmessungen nicht weitergehend zu untersuchen, da verlässliche Aussagen zur Schallabstrahlung des Abgaskamins auf Grundlage dieser Messergebnisse nicht formuliert werden können.



Die folgende Abbildung soll verdeutlichen, wie stark die Terz-Schalldruckpegel  $L_{80\text{Hz,eq}}$  für die unterschiedlichen Messhöhen entlang des Messstrahls 1 (fast identische Messwerte konnten im Messstrahl 2 ermittelt werden) differieren.

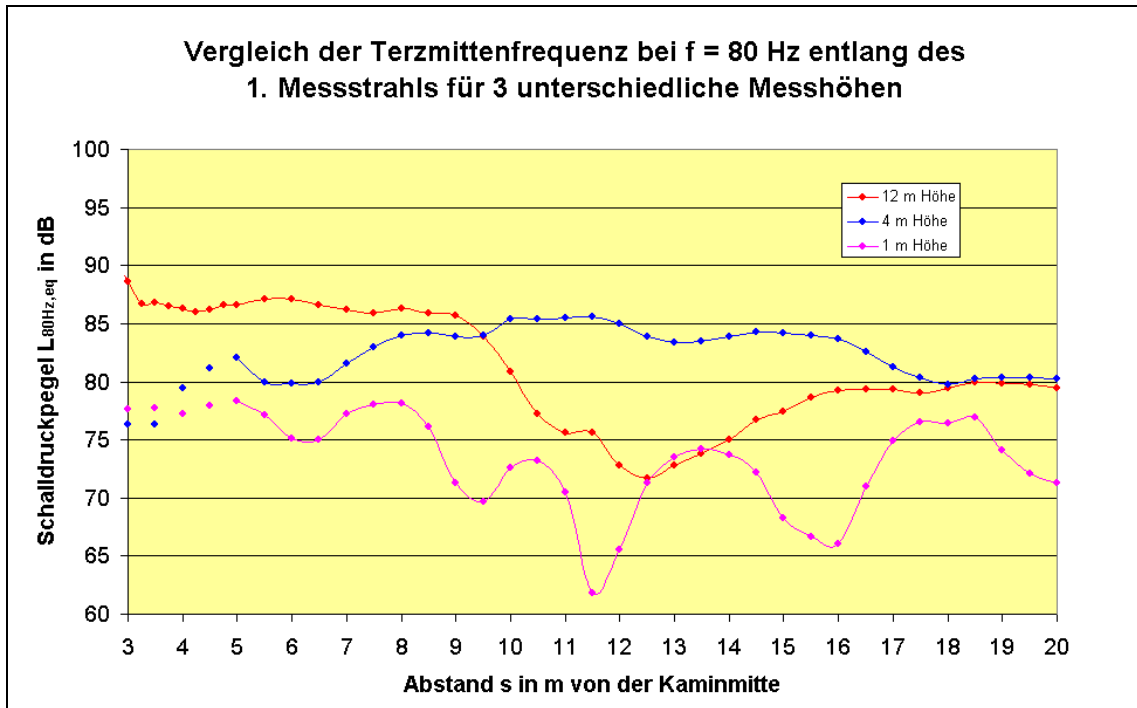


Abbildung 25: Messung Langenberg, MS1, 3 Messhöhen, 80 Hz

Die teilweise erhebliche Schwankung des Terz-Schalldruckpegels  $L_{80\text{Hz,eq}}$  in den verschiedenen Messhöhen führt zu der Erkenntnis, dass die Wahl einer geeigneten Messhöhe zur exakten Bestimmung der Schalleistung des Abgaskamins enorm wichtig ist. Die Schwankung des Schalldruckpegels für die verschiedenen Messhöhen beruht auf den Interferenzeffekten, bedingt durch die unterschiedlichen Abstände zum Boden.

Um den Einfluss von Interferenzeffekten im Nahbereich des Abgaskamins zu minimieren, scheint es aufgrund der vorangegangenen Messergebnisse sinnvoll, eine Messposition in Höhe des Abgaskamins zu wählen. Besonders interessant ist hierbei der Bereich der ersten Wellenlänge (bis in  $s = 4,5\text{ m}$  Abstand von der Kaminmitte), da dort das Direktschallfeld dominiert und Interferenzeffekte nicht so stark zum Tragen kommen sollten.

Für die weitere Auswertung der Messergebnisse soll deswegen die Messhöhe in  $h_3 = 12\text{ m}$  näher betrachtet werden.

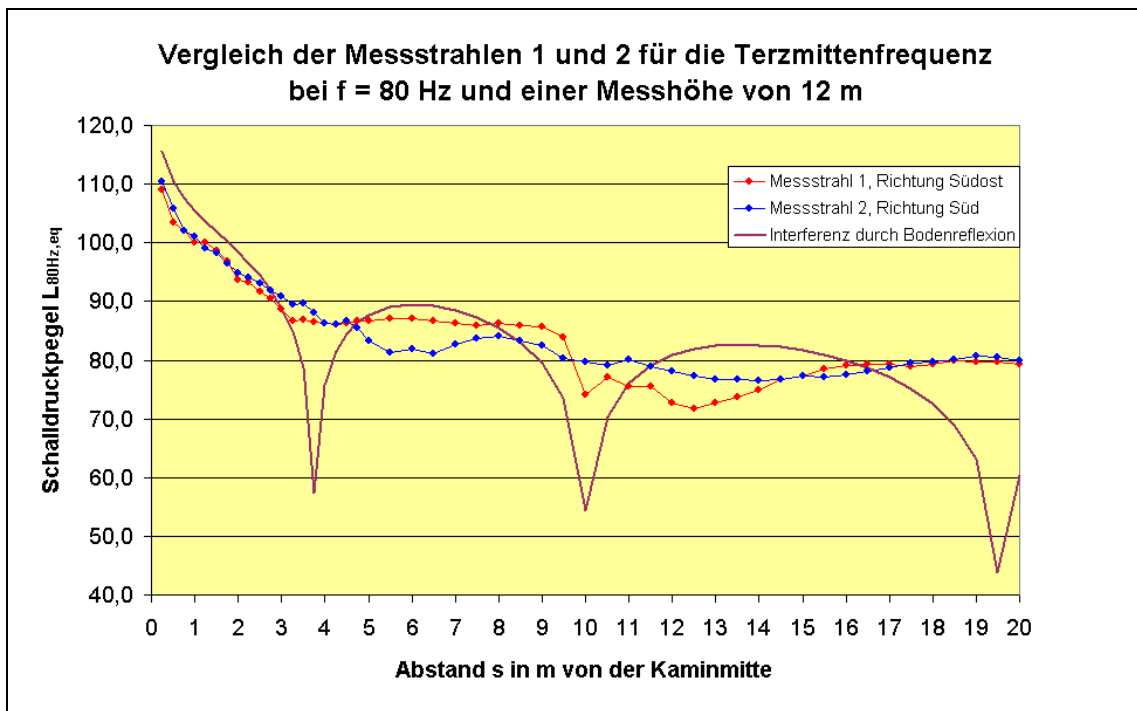


Abbildung 26: Messung Langenberg, 12 m, 80 Hz

Aus dem Diagramm ergibt sich für die beiden Messstrahlen eine geringe Abweichung im Nahbereich bis etwa  $s = 5$  m Abstand von der Kaminmitte. Erst danach gewinnt der Einfluss von Interferenzeffekten, bedingt durch Reflexionen der Schallwellen an der nordöstlich gelegenen Fermenterwand und dem Boden, an Bedeutung. Werden die beiden Messkurven mit der theoretisch zu erwartenden Messkurve verglichen, ergibt sich bei  $s = 10$  m Abstand (für den MS 1) eine Auslöschung. Verstärkungen sind im Bereich von  $s = 5$  m bis  $s = 9$  m sowie von  $s = 15$  m bis  $s = 20$  m zu erkennen. Insgesamt gesehen folgt die rote Kurve des MS 1 dem theoretischen Pegelverlauf im Gegensatz zum MS 2 besser.

Wie aus der Abbildung zu erkennen, ergeben sich für den Bereich bis  $s = 5$  m die geringsten Pegeldifferenzen für das betrachtete Terzband. Demzufolge soll dieser Bereich noch einmal genauer in der folgenden Abbildung untersucht werden.

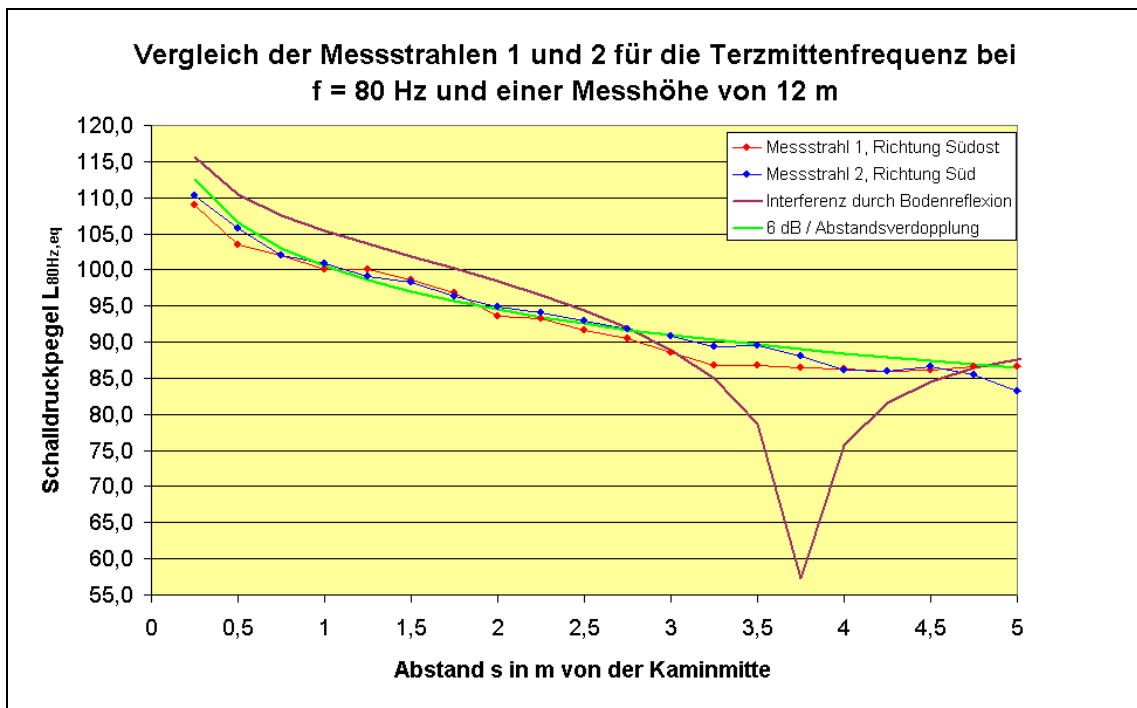


Abbildung 27: Messung Langenberg, 12 m, Bereich 0 bis 5 m, 80 Hz

Mit Hilfe der eingezeichneten theoretischen Kurve des 6 dB-Abfalls pro Abstandsverdopplung (grüne Kurve) lässt sich eine Reduktion des Schalldruckpegels bei  $f = 80$  Hz im Bereich bis  $s \approx 2,5$  m Abstand vom Kamin relativ gut beschreiben. Erst danach treten geringere Pegelunterschiede im Vergleich zu den beiden Messstrahlen auf. Im Gegensatz zu den Messhöhen bei  $h_1 = 1$  m und  $h_2 = 4$  m sind diese Messergebnisse sehr gut verwertbar, da sie einen eindeutigen Rückschluss auf die Schallabstrahlung des Abgaskamins geben. Interferenzeffekte durch näher gelegene Gebäude haben in diesem Bereich einen geringen Einfluss, da das Direktschallfeld des Abgaskamins maßgeblich die gemessenen Schalldruckpegel erzeugt. Weiterhin strahlt der Kamin die tieffrequenten Schallwellen in horizontale Richtung ungerichtet ab, was die geringen Pegelunterschiede der beiden Messstrahlen beweisen.

Für die weiteren messtechnischen Untersuchungen an BHKWs ist es sinnvoll, die Messungen in ähnlicher Weise durchzuführen. Ergeben sich dabei ähnliche Pegelverläufe im Nahbereich des Abgaskamins, so können allgemeine Forderungen für Emissionsmessungen am Abgaskamin von BHKWs getroffen werden.

#### 4.4 Oberbobritzsch

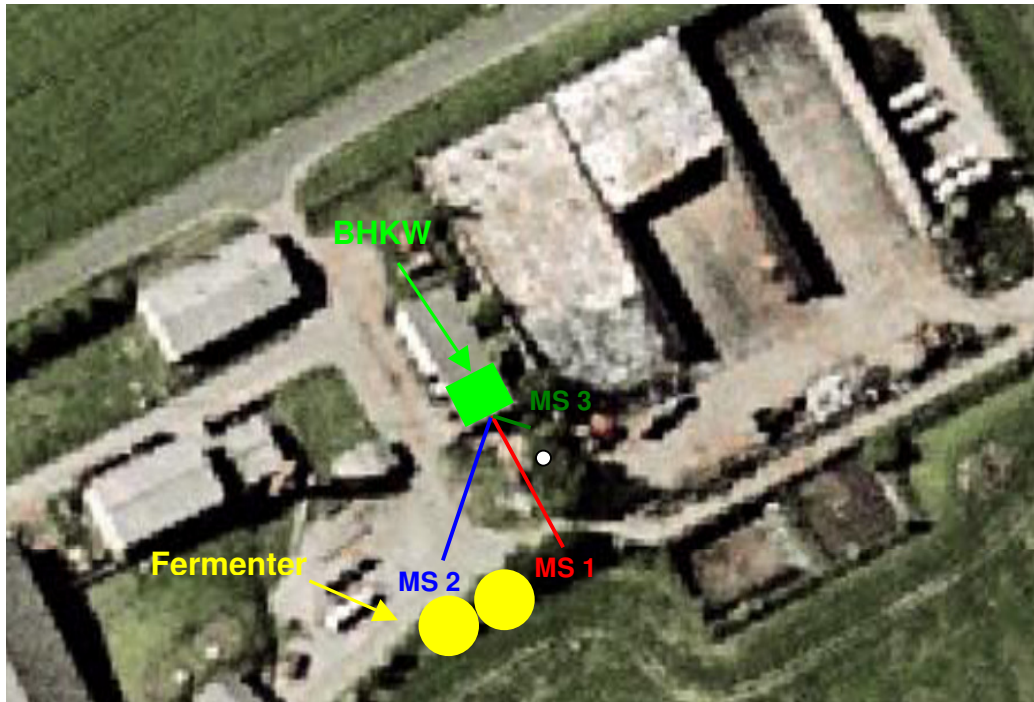


Abbildung 28: Übersichtsbild BHKW Oberbobritzsch, Maßstab ca. 1 : 7.000 /17/

##### 4.4.1 Beschreibung der Anlage

Das im Jahr 2007 durch die Agrar-Genossenschaft Bobritzschtal e.G. in Betrieb genommene Blockheizkraftwerk befindet sich im nordöstlichen Bereich des Betriebsgeländes. Zwei sich im südwestlichen Bereich des BHKWs befindliche Fermenter produzieren das für die Verbrennung notwendige Biogas aus der Gülle von rund 760 Milchkühen. Der 12 Zylinder V-Motor der Marke MAN (siehe Anlage 2b), mit einer Leistung von  $P_{el} = 300 \text{ kW}$  wurde in einem schon bestehenden, massiven Gebäude positioniert. Das Abgas wird über einen 5,5 m hohen Kamin abgeleitet (siehe Anlage 7).

Die Messungen an der Anlage wurden am 21.07.2009 in der Zeit von 9.15 Uhr bis 13.00 Uhr entlang dreier Messstrahlen in einer Höhe von jeweils  $h = 5,5 \text{ m}$  (Höhe der Kaminöffnung) und bis zu einem Abstand von  $s = 25 \text{ m}$  (MS 1 und 2) bzw.  $s = 5 \text{ m}$  (MS 3) von der Mitte des Abgaskamins durchgeführt. Eine zu Beginn der Messungen durchgeführte FFT-Analyse konnte die Existenz von zwei tonalen, tieffrequenten Komponenten für die Frequenzen von  $f_1 = 75 \text{ Hz}$  und  $f_2 = 37,5 \text{ Hz}$  im Spektrum nachweisen (siehe Anlage 7). Der ausgewertete

Pegel-Zeit-Verlauf der 80-Hz-Terz an einem anfangs gewählten Referenzmesspunkt (weiße Markierung in Abbildung 28) ergab ein zeitlich unveränderliches Anlagengeräusch über den gesamten Messzeitraum.

Da für dieses BHKW zwei tieffrequente tonale Komponenten existieren, wird die Auswertung der Messergebnisse auch anhand der zugehörigen Terzmittenfrequenzen (bei  $f_{\text{Terz}} = 80 \text{ Hz}$  und  $f_{\text{Terz}} = 40 \text{ Hz}$ ) vorgenommen. Das Messprotokoll kann der Anlage 7 entnommen werden.

### 4.4.2 Auswertung der Messwerte

Zunächst wird die Terzmittenfrequenz bei  $f_{\text{Terz}} = 80 \text{ Hz}$  in einem Abstand bis  $s = 25 \text{ m}$  betrachtet.

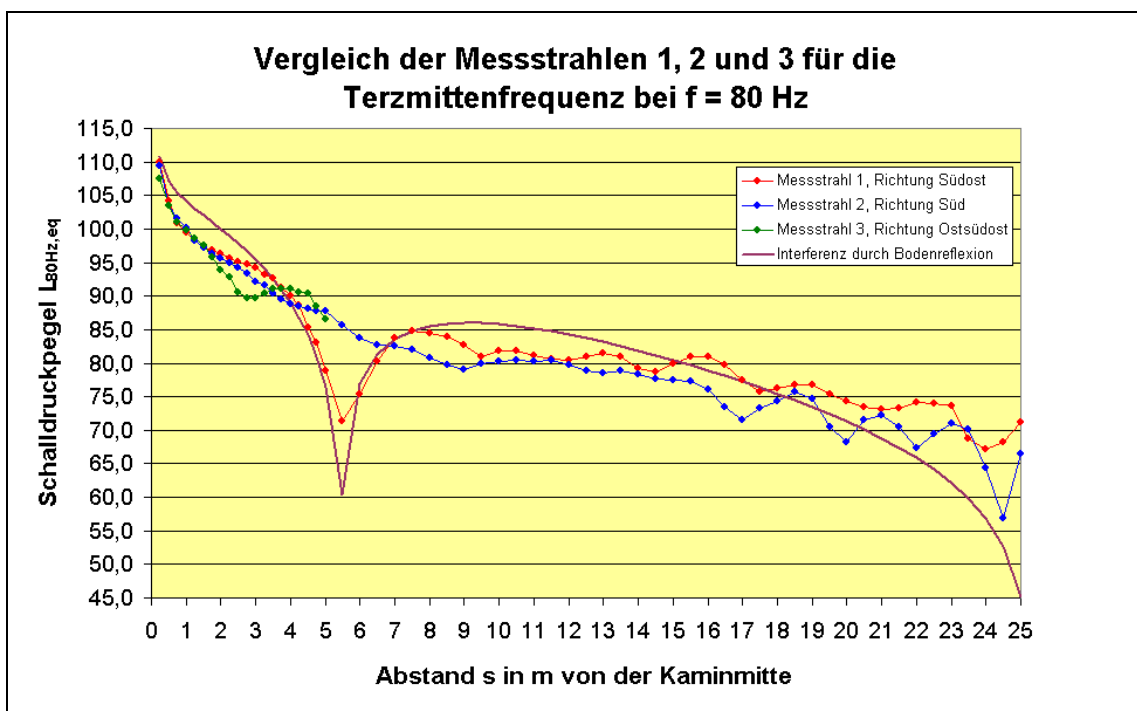


Abbildung 29: Messung Oberbobritzsch, 5,5m, Bereich 0 bis 25 m, 80 Hz

Die theoretisch ermittelten Werte ergeben Auslöschungen bei  $s = 5,5 \text{ m}$  und bei  $s \approx 25 \text{ m}$  und Verstärkungen bei  $s = 2 \text{ m}$  und  $s = 9 \text{ m}$ . Diesen theoretischen Schalldruckpegelverlauf spiegelt der MS 1 relativ gut wider. Eine Auslöschung ist bei  $s = 5,5 \text{ m}$  zu erkennen, eine geringe Verstärkung ist bei  $s = 3 \text{ m}$  und bei  $s = 8 \text{ m}$  erkennbar. Diese relativ ausgeprägte Auslöschung ist eindeutig auf die Interferenz durch Bodenreflexion zurückzuführen. Eine annähernd gleichartige

Auslöschung konnte im MS 2 bei  $s = 24,5$  m nachgewiesen werden. In diesem Bereich fällt die theoretische Kurve sehr stark ab. Es ist zu erkennen, dass die Messkurven im Bereich bis  $s = 4$  m sehr eng beieinander liegen. Die Messwerte der drei Messstrahlen liegen, wie für die Messung am BHKW in Langenberg, im interessanten Bereich (bis in  $s = 5$  m Abstand von der Kaminmitte) sehr eng beieinander. Deshalb soll dieser Bereich anhand der folgenden Abbildung näher beleuchtet werden:

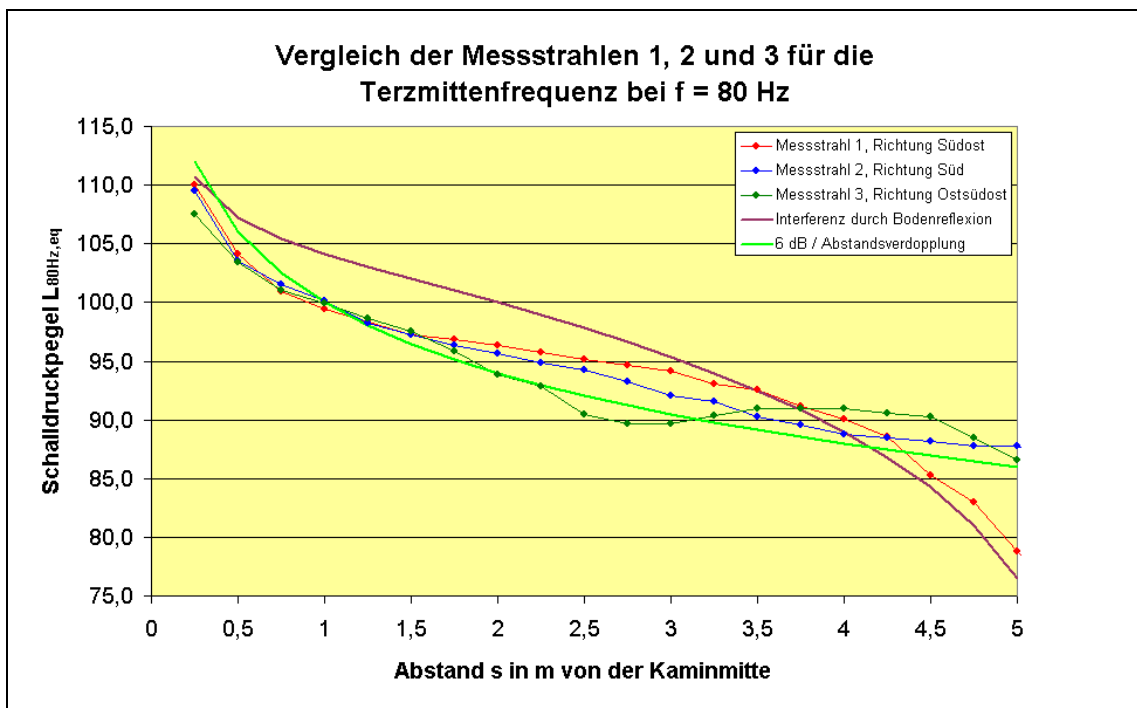


Abbildung 30: Messung Oberbobritzsch, 5,5m, Bereich 0 bis 5 m, 80 Hz

Für die Messstrahlen 1 und 2 kann bis zu einem Abstand von  $s = 4$  m von einer relativ guten Übereinstimmung der Messwerte gesprochen werden. Der MS 3 hingegen weist ab  $s = 2$  m bis  $s = 3$  m Abstand von der Kaminmitte um  $\Delta L \approx 5$  dB niedrigere Schalldruckpegel auf. In einem Abstand von  $s = 3,5$  m bis  $s = 4,5$  m hingegen übersteigen die Messwerte des Messstrahles 3 die der anderen beiden Messstrahlen. Die Ursache dieser Pegelunterschiede ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die entstehenden Interferenzerscheinungen an einer sich in östlicher Richtung vom Abgaskamin befindlichen Silo-Begrenzungswand zurückzuführen. Da die beiden anderen Messstrahlen teilweise weiter entfernt liegen, ist der Einfluss der Silowand im Nahbereich (bis  $s = 4$  m) des Abgaskamins diesbezüglich gering ausgeprägt.

Als Konsequenz der in Abbildung 30 aufgezeigten Messergebnisse resultiert die Forderung, Messungen an Abgaskaminen möglichst weit von reflektierenden Flächen entfernt durchzuführen. Je näher solche Flächen an den Abgaskamin heran rücken, umso stärker beeinflussen sie die exakten schalltechnischen Messungen am Abgaskamin, da das Direktschallfeld (ausgehend von der Kaminöffnung) mit einem teilweise stark die Messwerte beeinflussenden, reflektierenden Schallfeld (von einer nahen Begrenzungsfläche) interferiert.

Es sei weiterhin bemerkt, dass lediglich Schalldruckpegelmessungen bis zu einem Abstand von  $s = 2 \text{ m}$  von der Kaminmitte nicht von Interferenzen, bedingt durch Reflexionen an Begrenzungsflächen, beeinflusst wurden.

Neben der Interferenz durch Bodenreflexion wurde dem Diagramm die theoretische Kurve der Pegelabnahme von 6 dB pro Abstandsverdopplung hinzugefügt. Im Bereich bis  $s = 5 \text{ m}$  ergeben sich maximale Abweichungen um  $\Delta L \approx 2 \text{ dB}$ . Das bedeutet, dass sich auch diese Kurve für die Beschreibung des Nahfeldes sehr gut eignet.

Anhand der ermittelten Messwerte bis in  $s = 2 \text{ m}$  Abstand von der Kaminmitte kann auch von einer ungerichteten Schallabstrahlung des Abgaskamins für die betrachtete Frequenz gesprochen werden.

Die weitere Auswertung der Messergebnisse am BHKW in Oberbobritzsch soll sich mit der über den Abgaskamin emittierten Frequenz bei  $f = 37,5 \text{ Hz}$  beschäftigen.

Die auf der nächsten Seite folgende Abbildung zeigt die Schalldruckpegelabnahme der 40-Hz Terz im Bereich bis  $s = 25 \text{ m}$  Abstand von der Kaminmitte:

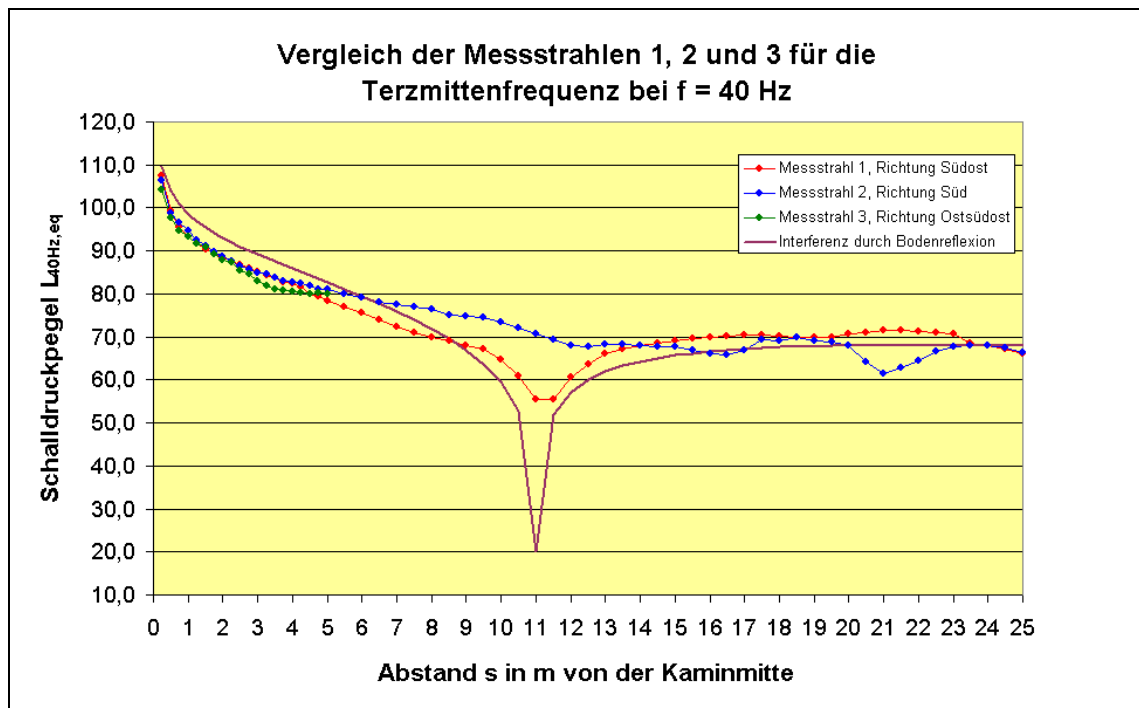


Abbildung 31: Messung Oberbobritzsch, 5,5m, Bereich 0 bis 25 m, 40 Hz

Im Gegensatz zur Terzmittenfrequenz bei  $f_{\text{Terz}} = 80$  Hz (Abbildung 29) fällt die Kurve bis zu einem Abstand von  $s = 10$  m relativ konstant, erst danach ist im MS 1 ein Einbruch im Pegel zu erkennen. Einen interessanten Gesichtspunkt stellt die Auslöschung bei  $s = 11$  m für den MS 1 dar. Werden die Abbildungen 29 und 31 verglichen, so erfolgte die Auslöschung der Schallwelle für die 80-Hz-Terz (diese Schallwelle besitzt genau die halbe Wellenlänge der 40-Hz-Terz) im MS 1 genau bei der Hälfte des Abstandes ( $s = 5,5$  m). Ein Vergleich der Kurven ist in der Anlage 7 zu finden. Die theoretische Kurve stimmt also sehr gut mit der gemessenen Kurve des MS 1 überein. Die erste Auslöschung im MS 2 kann bei  $s = 21$  m konstatiert werden, diese wird jedoch nicht durch die theoretische Kurve bestätigt. Für den MS 3 wurden wie bei der 80-Hz-Terz geringere Schalldruckpegel im Abstand von  $s \approx 3$  m gemessen. Dies ist wieder mit dem Einfluss der genannten Silo-Begrenzungswand und den damit verbundenen Interferenzerscheinungen zu begründen.

Es sei noch bemerkt, dass sich der Einfluss der Umgebung im Bezug auf entstehende Interferenzen bei der Terzmittenfrequenz von 40 Hz nicht so stark auf die Änderung des Schalldruckpegels auswirkt, wie bei der Terzmittenfrequenz bei  $f = 80$  Hz. Für die Terzmittenfrequenz bei 40 Hz ist ein insgesamt ruhigerer Kurvenverlauf mit geringeren Pegelschwankungen zu verzeichnen.



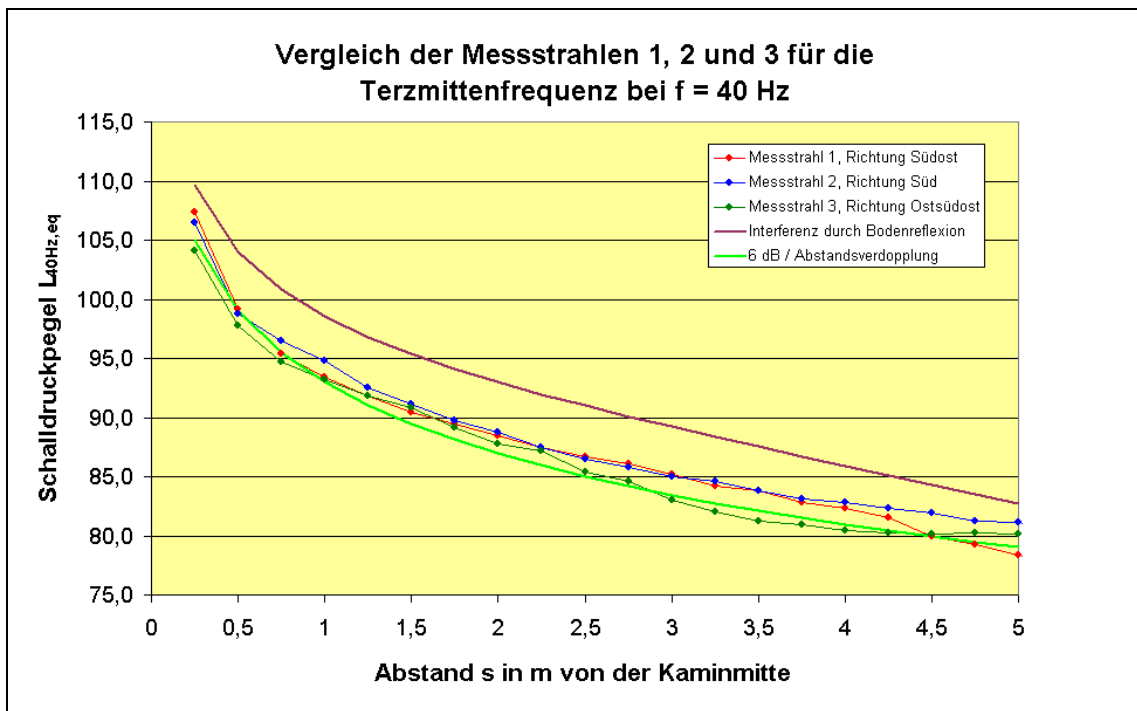


Abbildung 32: Messung Oberbobritzsch, 5,5m, Bereich 0 bis 5 m, 40 Hz

Wird der Abstand bis  $s = 5$  m näher betrachtet, so ist ein relativ gleichförmiger Pegelabfall in allen drei Messstrahlen zu beobachten. Die Ausbreitung der tieffrequenten Schallwellen der Terzmittenfrequenz bei  $f_{\text{Terz}} = 40$  Hz ist insgesamt betrachtet nicht so anfällig auf Pegelveränderungen wie die 80-Hz-Terz, was auf die Eigenschaften dieser langen Wellen zurückzuführen ist. Tieffrequenter Schall mit solch hohen Wellenlängen ( $\lambda_{40 \text{ Hz}} \approx 8,6 \text{ m}$ ) wird schlecht gedämpft und um Hindernisse sehr gut gebeugt, sodass er sich – je nach Intensität – kilometerweit nahezu ungehindert ausbreiten kann.

Wie für die 80-Hz-Terz wurde auch für diese Terzmittenfrequenz der normale Pegelabfall über die Entfernung in das Diagramm eingefügt. Es ist eindeutig zu erkennen, dass die Kurve der 6 dB Minderung pro Abstandsverdopplung den realen Pegelverlauf im Nahbereich besser trifft, als die theoretische Kurve der Interferenz durch Bodenreflexion.

## 4.5 Lichtenberg

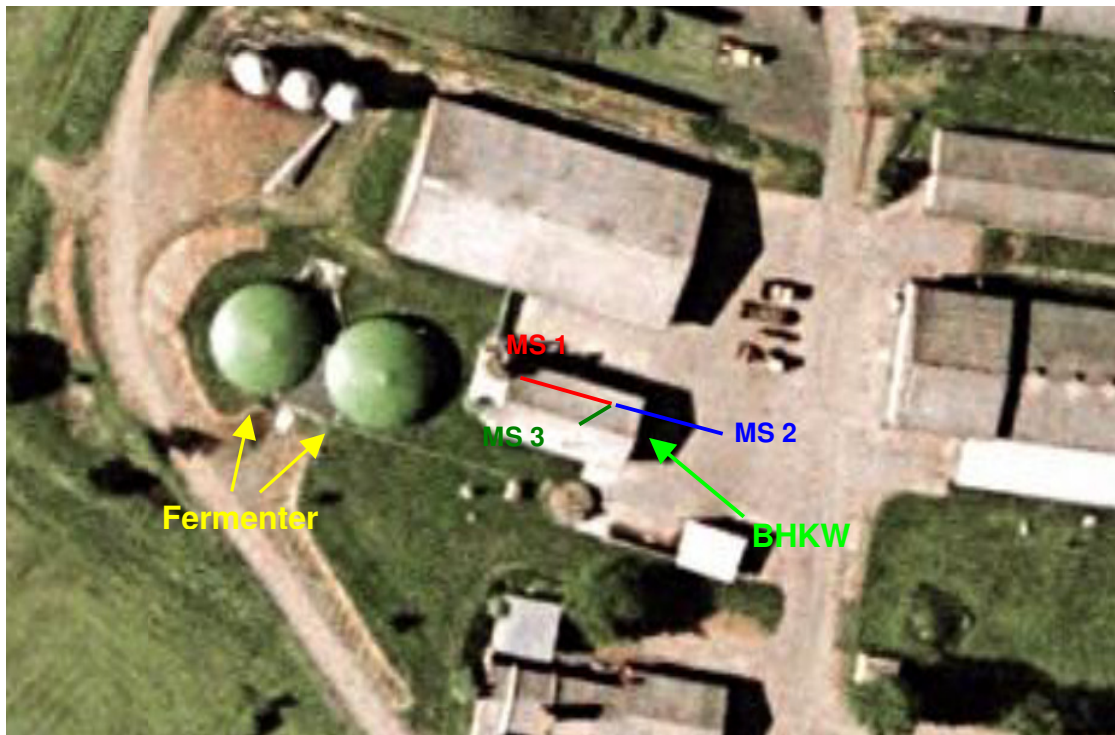


Abbildung 33: Übersichtsbild BHKW Lichtenberg, Maßstab ca. 1 : 7.000 /17/

### 4.5.1 Beschreibung der Anlage

Im Jahr 2007 wurde durch die in Lichtenberg ansässige Agrar-Genossenschaft Burgberg e.G. ein Blockheizkraftwerk errichtet und in Betrieb genommen. Der Motor wurde in ein schon bestehendes, massives Gebäude im südwestlichen Bereich des Betriebsgeländes integriert. Das Biogas entsteht in zwei sich nordwestlich der Anlage befindlichen Fermentern, in welchen die Gülle von 800 Milchkühen vergärt wird. Dieses Gas wird in einem 6-Zylinder Reihenmotor der Fa. Caterpillar (siehe Anlage 2c), mit einer elektrischen Leistung von  $P_{el} = 175$  kW, verbrannt. Über einen um  $90^\circ$  in Richtung Nordnordost abgewinkelten Kamin wird das Abgas in einer Höhe von  $h = 8,1$  m über Boden abgeleitet (siehe Anlage 8).

Die Messungen an der Anlage wurden am 31.07.2009 in der Zeit von 10.30 Uhr bis 14.15 Uhr entlang dreier Messstrahlen in einer Höhe von jeweils  $h = 8,1$  m (Höhe der Kaminöffnung über Boden) bzw.  $h = 2,1$  m (Höhe der Kaminöffnung auf dem Dach) und bis zu einem Abstand von  $s = 18$  m (MS 1 und 2 -  $90^\circ$  zur Ausblasöffnung) bzw.  $s = 5$  m (MS 3 -  $135^\circ$  zur Ausblasöffnung) von der Mitte

des Abgaskamins durchgeführt. Hierbei sei gleich bemerkt, dass die Auswertung der Messergebnisse nur auf den Messstrahlen 1 und 2 basieren soll, da sich für den MS 3 im Vergleich zum MS 1 keine wesentlichen Unterschiede ergaben (die Messwerte des MS 3 sind jedoch in der Anlage 8 zu finden).

Neben einer tieffrequenten tonalen Komponente bei einer Terzmittenfrequenz von  $f_{\text{Terz}} = 80 \text{ Hz}$  wurde eine zweite, tieffrequente Komponente, mit geringerer Intensität in der Terzmittenfrequenz bei  $f_{\text{Terz}} = 40 \text{ Hz}$  nachgewiesen (siehe Anlage 8). Während der gesamten Messzeit wurde durch den Betreiber der Anlage ein konstanter Volllastbetrieb des Verbrennungsmotors realisiert.

Da auch für dieses BHKW, identisch der Anlage in Oberbobritzsch, zwei tieffrequente tonale Komponenten existieren, wird die Auswertung der Messergebnisse wieder anhand der Terzmittenfrequenzen bei  $f_{\text{Terz}} = 80 \text{ Hz}$  und  $f_{\text{Terz}} = 40 \text{ Hz}$  vorgenommen.

#### **4.5.2 Auswertung der Messergebnisse**

Im Gegensatz zu den beiden vorangegangenen Messungen ergab sich für die Messung an diesem BHKW die Besonderheit der schon angesprochenen Abwinkelung des Kamins über Dach ( $90^\circ$  in Richtung Nordnordost) sowie eine geringere Messhöhe für den MS 1 (Messung entlang des Daches) von  $h_{\text{MS1}} = 2,1 \text{ m}$ . Für den MS 2 mussten die Höhen von  $h_{1,\text{MS2}} = 2,1 \text{ m}$  und  $h_{2,\text{MS2}} = 8,1 \text{ m}$  in der theoretischen Kurve Ansatz finden, da sich das Ende des Daches entlang des MS 2 in  $s = 2,5 \text{ m}$  Abstand von der Kaminmitte befand. Da im Gegensatz zu den beiden vorangegangenen Messungen hier 2 verschiedene Messhöhen betrachtet werden, muss dies in den theoretische Kurven Berücksichtigung finden. Deshalb wurden in den folgenden Abbildungen der vorliegenden Messung die theoretischen Kurven der Interferenz durch Bodenreflexion den jeweiligen Messkurven farblich angeglichen, um eine entsprechende Vergleichbarkeit der jeweiligen Messkurven zu erhalten. Dies ist mit den unterschiedlichen Laufzeitunterschieden der am Boden bzw. Dach reflektierten Wellen zum Messort zu begründen.

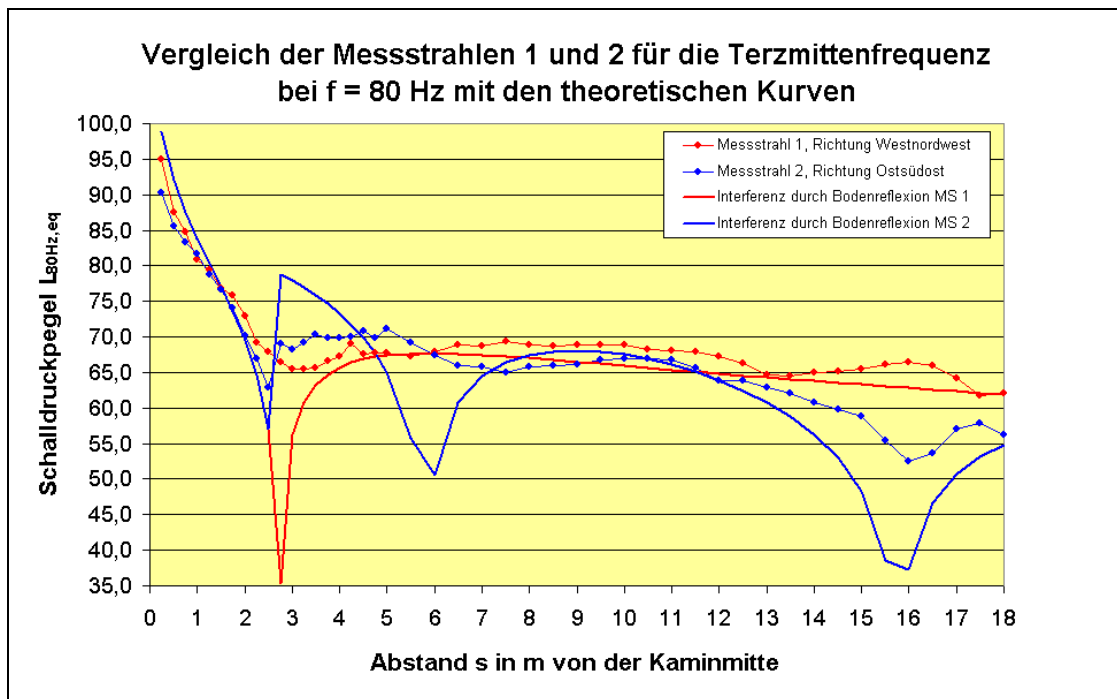


Abbildung 34: Messung Lichtenberg, 2,1 bzw. 8,1 m, Bereich 0 bis 18 m, 80 Hz

Es ist zu erkennen, dass die Messwerte im Nahbereich der Kaminmündung bis  $s = 2,5$  m sehr rapide abfallen. Dieser Abfall wird auch in den beiden theoretischen Kurven sehr gut berücksichtigt. Für den MS 1 ergibt sich ein theoretisches Minimum bei  $s = 2,75$  m. Das Minimum der Messwerte ist im gleichen Bereich um  $s \approx 3$  m zu finden, obgleich auch der starke theoretische Pegelabfall durch die realen Messwerte nicht nachgewiesen werden kann. Wird dagegen der MS 2 betrachtet, so folgen die Messwerte dem Trend der blauen theoretischen Kurve. Besonders interessant erscheint der Messwert bei  $s = 2,5$  m. An dieser Stelle befindet sich die Grenze des Daches. Für die theoretische Kurve wurde ab  $s > 2,5$  m eine Höhe von  $h_{2,MS2} = 8,1$  m berücksichtigt, was den starken Pegelanstieg der theoretischen blauen Kurve erklärt. Dieser Verlauf konnte aber auch durch die Messwerte im MS 2 nachgewiesen werden. Wird der MS 2 in seinem Verlauf weiter betrachtet, so folgt die theoretische Kurve den erfassten Werten tendenziell. Die Auslöschung bei  $s = 6$  m wird durch die gemessenen Werte nicht so extrem bestätigt. Umso besser folgen die Messwerte dem weiteren theoretischen Verlauf des MS 2. Genannt seien hier die geringen Differenzen der theoretischen und messtechnisch erfassten Schalldruckpegel im Bereich von  $7,5 \text{ m} < s < 12 \text{ m}$ . Darüber hinaus wird die Auslöschung Minimum bei  $s = 16$  m sehr gut durch den

realen Kurvenverlauf beschrieben. Die geringen Differenzen zwischen den realen und den theoretischen Werten sind auch für im MS 1 zu erkennen.

Werden die Messwerte bei  $s = 1$  m Abstand betrachtet, ergeben sich geringe Pegelunterschiede in den Messstrahlen, was wieder die relativ ungerichtete Schallabstrahlung für die zu betrachtenden tiefen Frequenzen am Abgaskamin beweist.

Die folgende Darstellung betrachtet den Bereich bis in  $s = 5$  m Abstand von der Kaminmitte.

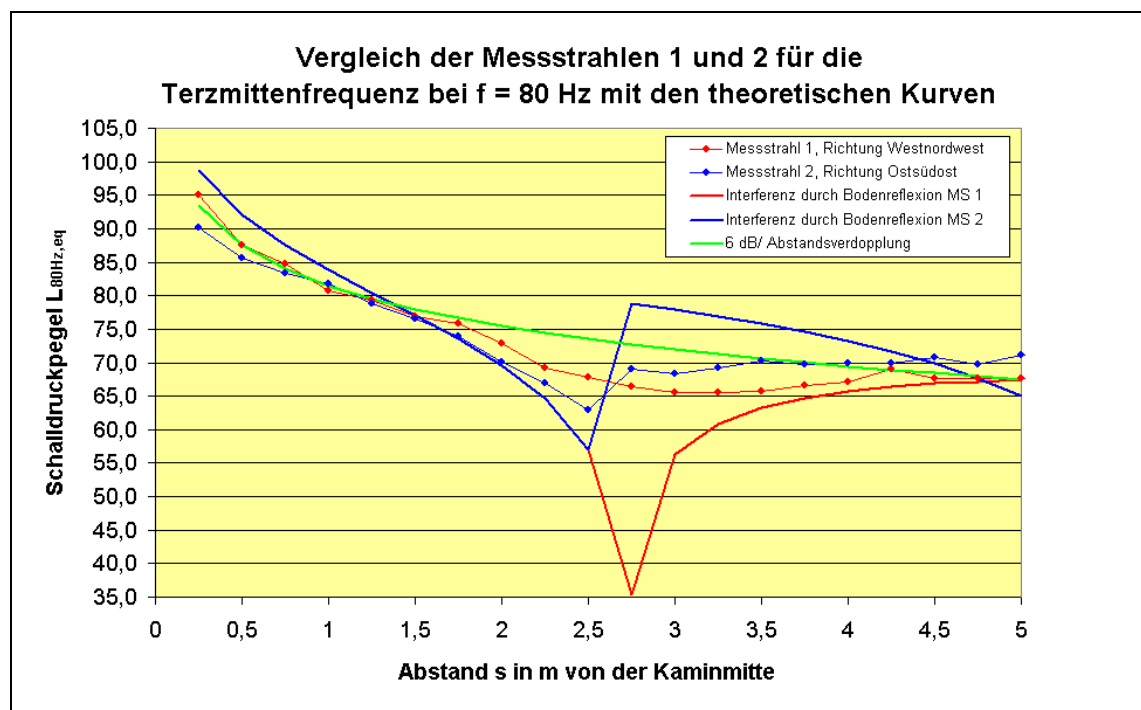


Abbildung 35: Messung Lichtenberg, 2,1 bzw. 8,1 m, Bereich 0 bis 5 m, 80 Hz

Es ist zu erkennen, dass sich für Messungen an diesem Abgaskamin nur der Bereich bis in  $s = 2,25$  m eignet, da danach erste Interferenzerscheinungen auftreten. Wie schon in den vorangegangenen Messungen ist weiterhin zu erkennen, dass im Nahfeld bis  $s = 1$  m Abstand vom Kamin der Schalldruckpegel extrem stark abklingt. Deshalb ist dieser Messbereich, wie der Bereich ab  $s = 2,5$  m Abstand von der Kaminmitte, für Schalldruckpegelmessungen eher ungeeignet, da sich, bedingt durch nur geringe fehlerhafte Abstandsbestimmung zum Mittelpunkt des Abgaskamins, auch ein relativ hoher Messfehler ergeben kann. Genannt sei der Schalldruckpegelabfall für den MS 1 von  $s = 0,25$  m bis  $s = 0,5$  m. In diesen

Bereich fällt der Schalldruckpegel um  $\Delta L_{80\text{Hz}} = 8 \text{ dB}$  ab. Wird dieser Zusammenhang linearisiert, so ist ein Abfall des Schalldruckpegel um  $\Delta L_{80\text{Hz}} \approx 2 \text{ dB}$  bei einer Abstandsänderung von  $\Delta s = 0,05 \text{ m}$  zu konstatieren. Der theoretische Pegelverlauf der grünen Kurve beschreibt den realen Kurvenverlauf der 3 Messstrahlen wieder sehr gut.

Wird die Terzmittenfrequenz bei  $f_{\text{Terz}} = 40 \text{ Hz}$  betrachtet, so ergibt sich wieder ein relativ „ruhiger“ Pegelverlauf im Gegensatz zu dem der 80-Hz-Terz.

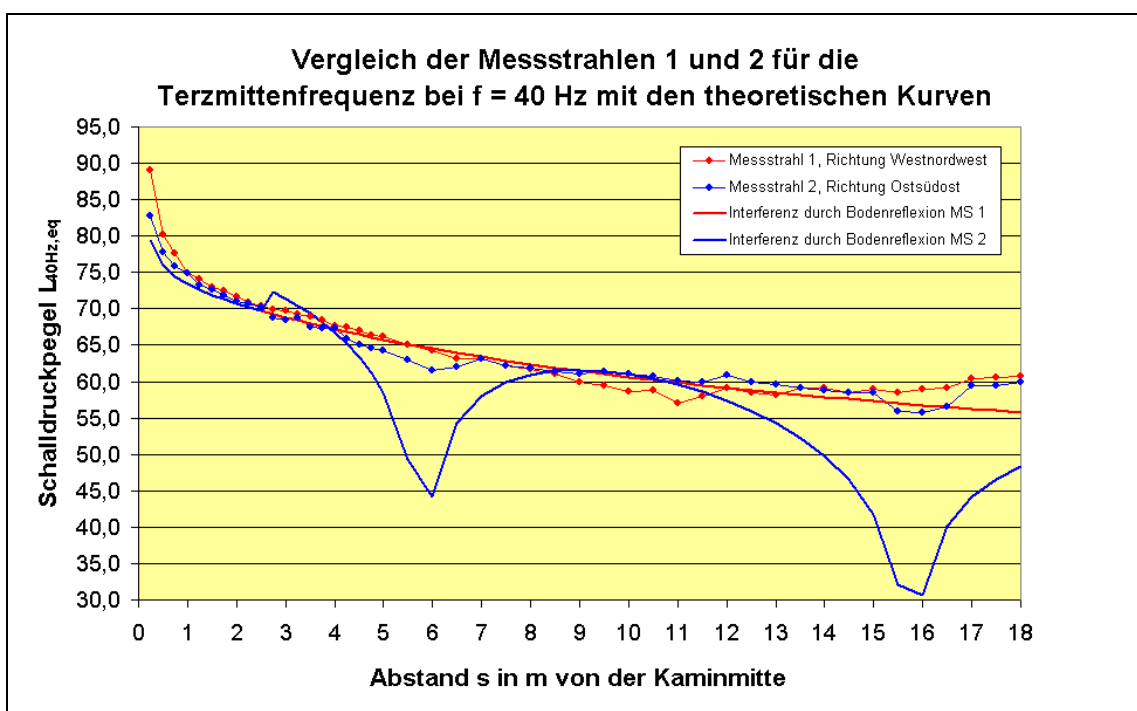


Abbildung 36: Messung Lichtenberg, 2,1 bzw. 8,1 m, Bereich 0 bis 18 m, 40 Hz

Die Messwerte des MS 1 werden durch die theoretische Kurve sehr gut beschrieben. Es ergeben sich im gesamten Messbereich nur geringe Abweichungen. Gleiche Aussagen können für die Kurven des MS 2 getroffen werden. Den theoretischen Auslöschungen bei  $s = 6 \text{ m}$  und  $s = 16 \text{ m}$  wird auch durch geringere Messwerte in den jeweiligen Bereichen Rechnung getragen. Wird der Bereich bis zu einem Abstand von  $s = 5 \text{ m}$  betrachtet, so ist zu erkennen, dass die Schalldruckpegel der unterschiedlichen Messstrahlen relativ gut übereinstimmen. Dies wird in der folgenden Abbildung detaillierter dargestellt.

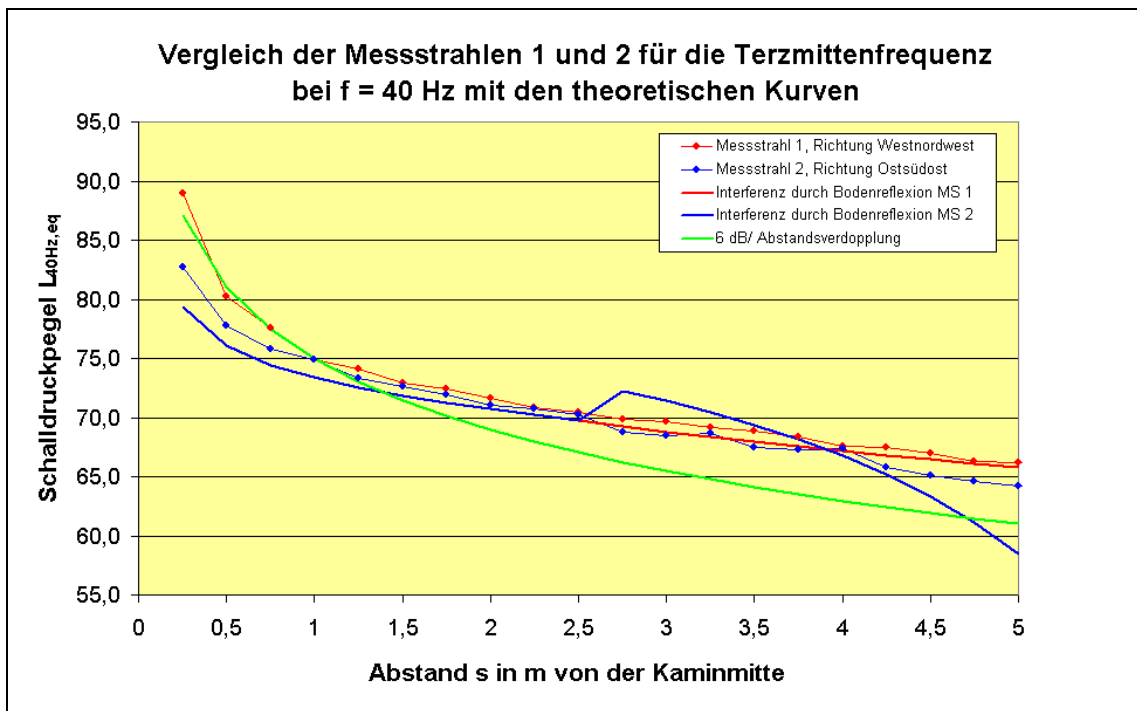


Abbildung 37: Messung Lichtenberg, 2,1 bzw. 8,1 m, Bereich 0 bis 5 m, 40 Hz

Pauschal kann gesagt werden, dass sich für diese Terzmittenfrequenz der Abstand bis  $s = 5$  m, also der doppelte Messabstand wie bei der 80-Hz-Terz, eignet, um genaue Aussagen über die Schallabstrahlung des Abgaskamins zu treffen. Diese Aussage erscheint aufgrund der doppelten Wellenlänge der 40-Hz-Terz auch plausibel.

Werden die bisher ausgewerteten Messwerte aller BHKWs noch einmal genauer betrachtet, so zeichnet sich ein Trend in den Messergebnissen ab. Besonders sei auf den Bereich bis  $s = 5$  m Abstand (genauer  $1\text{ m} < s < 2\text{ m}$ ) von der Kaminmitte hingewiesen. In keinem anderen Messbereich sind sich die Messwerte der einzelnen Messstrahlen für die beiden Terzmittenfrequenzen bei  $f_{\text{Terz}} = 80$  Hz und  $f_{\text{Terz}} = 40$  Hz ähnlicher. Die Auswertung der Messergebnisse der letzten Emissionsmessung soll sich dementsprechend nur auf den Nahbereich bis  $s = 5$  m Abstand von der Kaminmitte beziehen.



## 4.6 Reinhardtsdorf



Abbildung 38: Übersichtsbild BHKW Reinhardtsdorf, Maßstab ca. 1 : 7.000 /17/

### 4.6.1 Beschreibung der Anlage

Durch die Agrargenossenschaft „Oberes Elbtal“ Reinhardtsdorf e.G. wurde im Jahr 2008 ein Blockheizkraftwerk errichtet. Dieses Aggregat wurde in einem sich schon auf dem Betriebsgelände befindlichen, massiven, zentral gelegenen Gebäude positioniert. Die Anlage verbrennt das Biogas, welches über zwei sich in  $s \approx 100$  m nördlich des BHKWs befindlichen Fermentern produziert wird. Der 12-Zylinder V-Motor der Fa. MAN besitzt eine elektrische Leistung von  $P_{el} = 400$  kW. Über eine durch die Nordwest-Fassade des BHKW-Gebäudes durchgeführte Abgasleitung wird das erzeugte Abgas über ein sich in  $h_{Kamin} = 10,1$  m befindliche Kaminöffnung in die Umwelt emittiert (siehe Anlage 9). Die Durchführung der Schallpegelmessungen erfolgte am 07.08.2009 in der Zeit von 11.15 Uhr bis 14.15 Uhr entlang dreier Messstrahlen in einer Höhe von  $h = 3,5$  m (Höhe der Kaminöffnung über dem Dach – für MS 1) bzw.  $h = 10,1$  m (Höhe der Kaminöffnung über Boden – für MS 2 und 3) und bis zu einem Abstand von  $s = 20$  m (MS 1 und 2) bzw.  $s = 5$  m (MS 3) von der Mitte des



Abgaskamins bei konstantem Volllastbetrieb des Verbrennungsmotors. Wie schon an den Anlagen in Oberbobritzsch und Lichtenberg konnte auch an diesem BHKW die Existenz von zwei tieffrequenten tonalen Komponenten bei  $f_1 = 75 \text{ Hz}$  und  $f_2 = 37,5 \text{ Hz}$  mittels einer FFT-Analyse nachgewiesen werden. In der Anlage 9 sind neben dieser FFT-Analyse auch die gemessenen Schalldruckpegel der jeweiligen Messstrahlen für die beiden tieffrequenten tonalen Komponenten aufgeführt und als Diagramm für den Abstand bis  $s = 20 \text{ m}$  vom Kamin dargestellt.

## 4.6.2 Auswertung der Messergebnisse

Gleich zu Beginn der Auswertung wird darauf hingewiesen, dass aufgrund der ähnlichen Pegelverläufe der Messstrahlen 2 und 3 nur der MS 2 für die Auswertung herangezogen wird, da dieser bis zu einem Abstand von  $s = 20 \text{ m}$  ermittelt wurde.

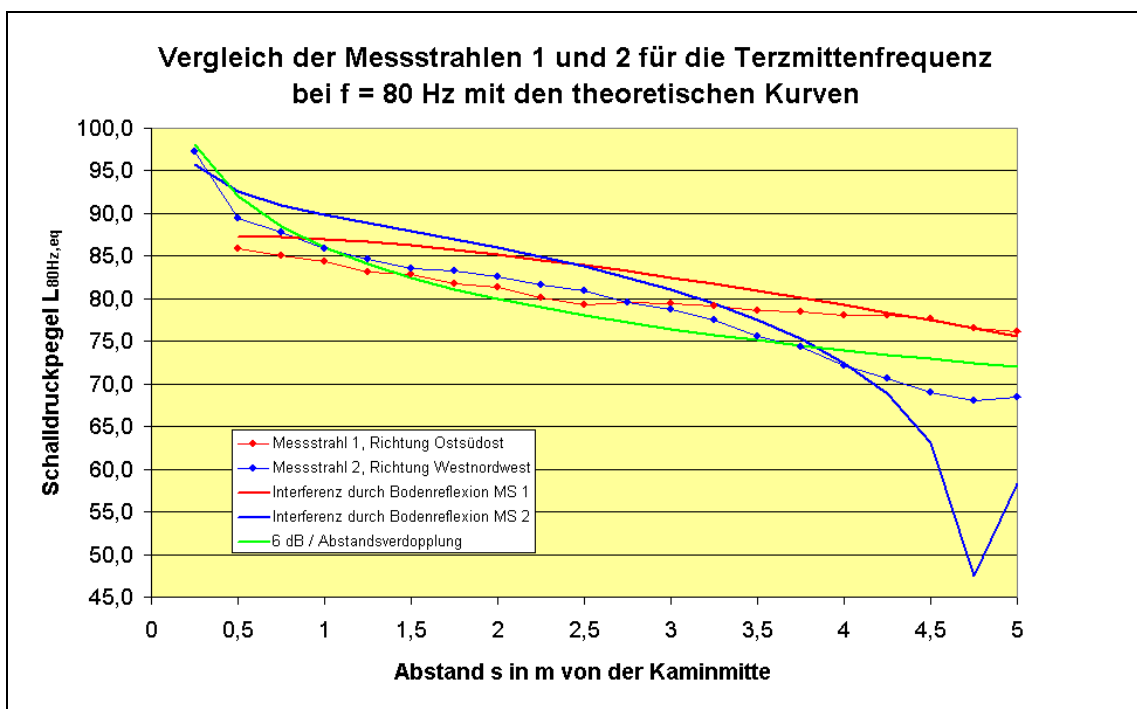


Abbildung 39: Messung Reinhardtsdorf, 3,5 bzw. 10,1 m, Bereich 0 bis 5 m, 80 Hz

Aus der Abbildung 39 ist zu erkennen, dass die ermittelten Schalldruckpegel für die beiden verschiedenen Messstrahlen für den Messabstand von  $1 \text{ m} < s < 3,25 \text{ m}$  bis auf minimale Abweichungen identisch sind, was wieder die

geringe Richtwirkung des Abgaskamins auf horizontaler Ebene beweist. Die theoretische Kurve des MS 1 beschreibt die Kurve der tatsächlich gemessenen Schalldruckpegel nur bedingt. Im Gegensatz dazu werden die gemessenen Schalldruckpegel des MS 2 besser durch die zugehörige theoretische (blaue) Kurve beschrieben. Genannt sei hier die Auslöschung bei  $s = 4,75$  m, welche auch in den Messwerten tendenziell nachgewiesen werden konnte. Insgesamt gesehen erfasst die theoretische Kurve des 6 dB Abfalls pro Abstandsverdopplung die reale Situation im aufgezeigten Messabstand besser, als die beiden theoretischen Kurven der Interferenz durch Bodenreflexion.

Ähnliche Ergebnisse ergeben sich für die Terzmittenfrequenz bei  $f_{\text{Terz}} = 40$  Hz.

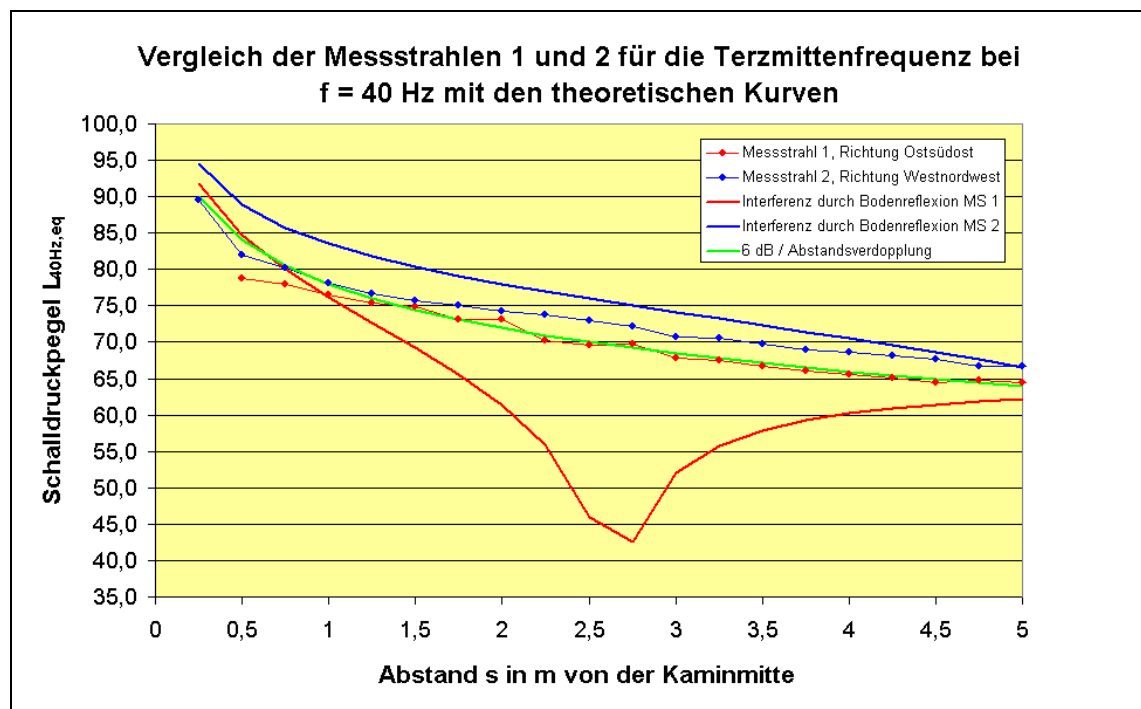


Abbildung 40: Messung Reinhardtsdorf, 3,5m bzw. 10,1 m, Bereich 0 bis 5 m, 40 Hz

Die ermittelten Schalldruckpegel für den MS 1 und 2 stimmen mit der grünen theoretischen Kurve der Pegelminderung über den Abstand fast überein. Insgesamt gesehen besitzen die beiden Messstrahlen nur geringe Pegelunterschiede im betrachtenden Abstand. Das Minimum der theoretischen roten Kurve konnte im MS 1 mit einem geringen Pegelabfall nachgewiesen werden. Hier sei der fallende Messwert bei  $s = 2,25$  um  $\Delta L \approx 3$  dB zum Messwert bei  $s = 2$  m genannt.

Die geringsten Pegelunterschiede der 40-Hz-Terz sind für die beiden Messstrahlen im Bereich von  $1\text{ m} < s < 2\text{ m}$  zu finden. Dieser Messbereich der geringsten Abweichungen ist im idealen Messbereich für die 80-Hz-Terz mit integriert, was bedeutet, dass die beiden betrachteten Terzfrequenzen ( $f_{\text{Terz}} = 40\text{ Hz}$  und  $f_{\text{Terz}} = 80\text{ Hz}$ ) bei Abnahmemessungen nicht getrennt – im Sinne eines unterschiedlichen Messabstandes – erfasst werden müssten.

#### 4.7 Tieffrequente Schallausbreitung in Wohnräumen

Diese Messung soll als Abschätzung dienen, inwieweit tiefe Frequenzen durch das zumeist schalltechnisch schwächste Bauteil eines Hauses, das Fenster, welches als Tiefpassfilter wirkt, in einen Wohnraum eingetragen werden. Diese Nachweisführung ist deshalb wichtig, da für den interessierenden Frequenzbereich keine Anforderungen an die Schalldämmung der Fenster gestellt werden (in Prüfverfahren wird nur der Bereich von  $f = 100\text{ Hz}$  bis  $f = 3150\text{ Hz}$  betrachtet). Besonders von Bedeutung ist dabei die minimale Pegeldifferenz  $L_{\text{außen}}$  (vor dem geöffneten Fenster) –  $L_{\text{innen}}$  (lautester Messort im Raum), welche im Wesentlichen von drei Faktoren des Wohngebäudes bzw. der zu schützenden Wohnräume abhängig ist:

**Faktor 1.** Gleichen sich die Abmessung der Gebäudefassade mit der dominierend einwirkenden Wellenlänge, so bildet sich ein Druckstau vor dem Gebäude aus, was zu einem Pegelanstieg von  $\Delta L = 10\text{ dB}$  vor der Hausfassade und bis zu  $\Delta L = 16\text{ dB}$  in Hausnischen, im Gegensatz zu Messwerten neben dem Gebäude, führt /3/.

**Faktor 2.** Gleichen sich die Raumabmessung des Wohnraumes mit einem ganzzahligen Vielfachen der tieffrequent einwirkenden halben Wellenlänge, so kommt es zu Ausbildung von stehenden Wellen, welche einen Pegelanstieg von der Zimmermitte zu den Raumwänden von  $\Delta L = 20$  bis zu  $\Delta L = 40\text{ dB}$  hervorrufen können.

**Faktor 3.** Je nach der Güte der in dem Wohngebäude verbauten Fenster (SSK), erfahren die tiefen Frequenzen eine Pegelminderung von  $\Delta L = 10\text{ dB}$  und weniger, wenn die (im Faktor 2) genannten stehenden Wellen auftreten.

Um den tieffrequenten Schalleintrag in Wohnräume zu untersuchen wurde folgender Messaufbau gewählt:

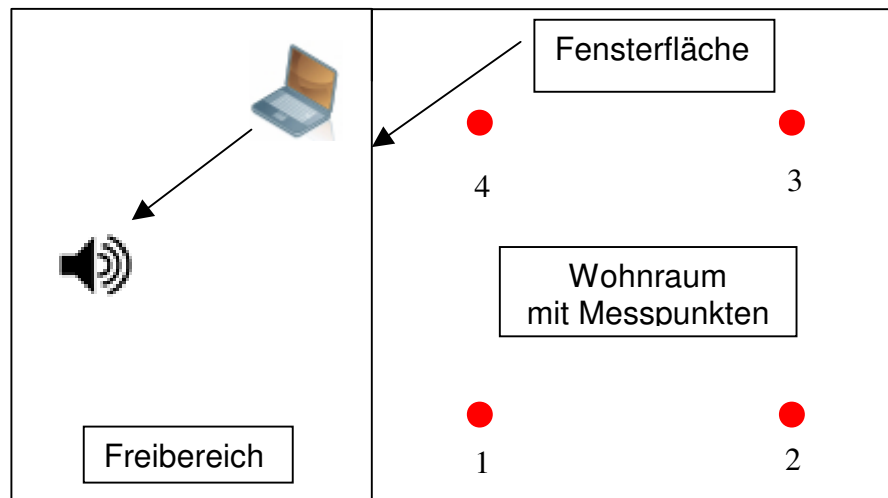


Abbildung 41: Schematische Darstellung des Messaufbaus

Auf einer Terrasse wurde im Freibereich vor einem Gebäude eine Tieftonbox aufgestellt, welche mittels eines Rechners verbunden wurde. Durch eine installierte Software konnten verschiedenste Töne generiert werden, welche dann letztendlich über den Tieftöner abgestrahlt wurden.

Zuerst erfolgte eine Messung bei geöffnetem Fenster (siehe Anlage 10), um Aussagen über den vor dem Fenster anliegenden Schalldruckpegel der jeweiligen Messfrequenz zu erhalten. Danach wurde das Fenster (2-fach verglastes Fenster der Schallschutzklasse 2,  $R_w = 34$  dB) geschlossen und Messungen im Innenraum nach dem im Kapitel 2.4 erläuterten Verfahren an vier Messpunkten (siehe rote Punkte in der Abbildung 41) durchgeführt. Insgesamt wurden sechs Messreihen durchgeführt. Der gewählte Frequenzbereich begann ab  $f_{MR1} = 100$  Hz und wurde um  $\Delta f = 12,5$  Hz bis  $f_{MR6} = 37,5$  Hz reduziert.

Die Messwerte können der Anlage 10 entnommen werden, die dabei rot gekennzeichneten Werte stellen die Messpunkte der höchsten Pegel (die höchsten Pegel bedeuten den ungünstigsten Aufenthaltsort im Wohnraum für die jeweilige untersuchte Frequenz) dar.

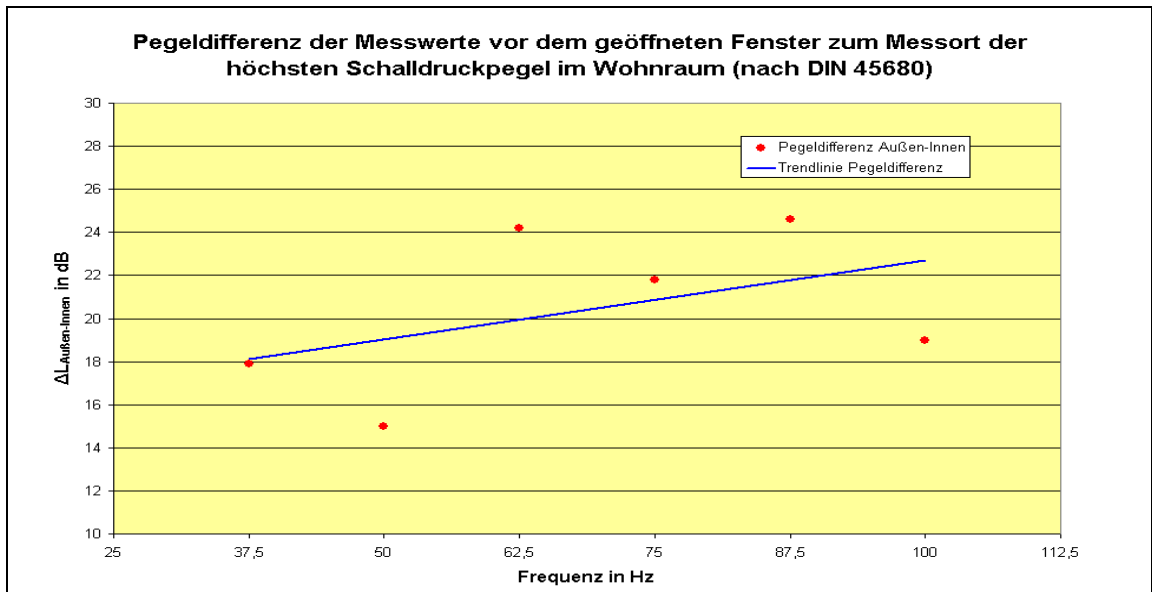


Abbildung 42: Pegeldifferenz außen/innen mit Trendkurve (lineare Regression)

Die Trendkurve lässt erkennen, dass mit sinkender Frequenz die Schalldämmung des untersuchten Fensters abnimmt. Die Abmessung des untersuchten Raumes begünstigten die Entstehung von stehenden Wellen, bei  $f = 100 \text{ Hz}$  und  $f = 50 \text{ Hz}$ , was sich in einer nachweislich verminderten „scheinbaren“ Schalldämmung widerspiegelt.

## 5 Interpretation und Schlussfolgerungen aus den Messergebnissen

Aus der Auswertung der durchgeführten Schalldruckpegelmessungen an den Abgaskaminen von BHKWs resultiert die Erkenntnis, dass ein eindeutiger Rückschluss auf das tieffrequente Emissionsverhalten des Kamins nur im Nahbereich dieser Quelle gewonnen werden kann. Die Untersuchungen zeigen, dass es nötig ist, die Messungen **waagrecht zur Kaminmündung** (in Höhe des Abgaskamins) und in einem **Abstand von einem bis maximal zwei Metern zur Mitte des Kamins** durchzuführen. Der Bereich des ersten Meters von der Kaminmitte ist für Messungen ungeeignet, da der Schalldruckpegel extrem schnell abfällt und damit geringe Fehler bei der Abstandsbestimmung (zur Kaminmitte) einen hohen Messfehler des Schalldruckpegels implizieren können. Wird dagegen ein zu hoher Messabstand - größer als zwei Meter - gewählt, so gewinnen Interferenzeinflüsse infolge von Reflexionen der Schallwellen an den dem Abgaskamin nahe gelegenen Begrenzungsflächen (z.B. durch das Dach eines BHKW-Gebäudes oder dem BHKW nahe gelegene Gebäude) einen teilweise nicht unerheblichen Einfluss.

Die in den Abbildungen eingezeichnete theoretische Kurve des 6 dB Abfalls pro Abstandsverdopplung entspricht für das Nahfeld in fast allen Fällen dem realen Abfall des Schalldruckpegels. Erst danach ergeben sich größere Pegelunterschiede, da die auftretenden Interferenzerscheinungen in dieser Kurve nicht mit erfasst werden. Diese Erscheinungen hingegen werden durch die zweite theoretische Kurve der „Interferenz durch Bodenreflexion“ mit berücksichtigt. Die Kurve folgt der realen Situation im Nahbereich zwar nur bedingt, dafür wird die Schallausbreitung tieffrequenter Schallwellen im weiter entfernten Abstand von der Kaminmündung jedoch adäquat bewertet (siehe Ergebnisse aus /1/). Weiterhin können „Einbrüche“ des Schalldruckpegels infolge der Reflexion am Boden und die dadurch auftretenden Interferenzerscheinungen mit dieser theoretischen Kurve ab einem Abstand von  $s = 2 \text{ m}$  relativ gut vorhergesagt werden (siehe z.B. Abb. 29 & 31), obgleich die theoretische Auslöschung den tatsächlichen Pegelabfall überbewertet.

Eine Richtcharakteristik des Abgaskamins ist für die untersuchten tieffrequenten Terzmittenfrequenzen in horizontaler Richtung nicht zu erkennen.

## 6 Möglichkeiten des technischen Schallschutzes zur tieffrequenten Emissionsbegrenzung

Aus den Messergebnissen geht hervor, dass die Teilschallquellen eines BHKWs, wie die Notkühler, die Zu- und Abluftöffnungen und die BHKW-Einhausung tieffrequenten Schall emittieren können (siehe auch Ausführungen in Punkt 1.3). Jedoch ist deren tieffrequente Emission nicht vergleichbar mit der des Abgaskamins, da die Schallenergie der tiefen Frequenzen meist zu gering ist, um eine Richtwertüberschreitung bei weiter vom BHKW entfernten Wohngebäuden hervorzurufen. Für kurze Abstände zur Wohnbebauung sollte diesen Quellen jedoch ein nicht minder hohes Maß an Aufmerksamkeit bezüglich des (tieffrequenten) Lärmschutzes geschenkt werden. Aus den Messergebnissen resultiert die Erkenntnis, dass besonders der Abgaskamin die dominant tieffrequent emittierende Schallquelle eines BHKWs darstellt. Die folgenden Erläuterungen sollen deshalb den zu realisierenden Schallschutz am Abgaskamin näher beleuchten.

Wie schon im Punkt 3.1 beschrieben wurde, wird je nach Bauart des zum Einsatz kommenden BHKWs ein spezielles Schallspektrum an der Abgasmündung des Verbrennungsmotors erzeugt, was zumeist aus den jeweiligen Datenblättern der Motoren entnommen werden kann. Die Wahl eines geeigneten Schalldämpfers ist deshalb auf der Grundlage dieses Schalleistungsspektrums zu treffen. Um die meist dominant tieffrequenten Spektralanteile hoher Energie selektiv zu bedämpfen, ist deshalb zum zur Standartausrüstung des BHKWs gehörigen Absorptionsschalldämpfers der **zusätzliche Einbau eines Resonanzschalldämpfers in den Abgasstrang erforderlich** (siehe auch Punkt 3.2.2.2). Darüber hinaus können sich durch die sich an die Abgasmündung des Motors anschließenden Rohrleitungen, besonders im tieffrequenten Bereich, Resonanzerscheinungen im Rohrsystem ergeben (siehe Abbildung 11), die eine Erhöhung des Schallpegels der jeweiligen Frequenzen hervorrufen. Jedoch kann der Grad dieser Rohrresonanzanregung im Vorfeld der Errichtung eines BHKW, aufgrund der relativ komplizierten Schallausbreitung in Rohren, nicht bzw. nur sehr ungenau

abgeschätzt werden. Deshalb ist ein Einbau eines Resonanzschalldämpfers „auf der sicheren Seite“ d.h. mit einer möglichst **hohen Einfügungsdämpfung für die jeweilige(n) dominante(n) Frequenz(en)** im Zuge der Errichtung des BHKWs von Vorteil, da so zumeist nicht nachträglich Schallschutzmaßnahmen erforderlich werden.

Das folgende Beispiel soll zur besseren Verständlichkeit des beschriebenen Problems beitragen.

Tabelle 4: Vergleich des Schallspektrums der Abgasmündung des Motors mit der in einer Schallprognose geforderten, maximal zulässigen Schallleistungspegel der Kaminmündung und der resultierenden Anforderung an den Schalldämpfer

f <sub>Oktav</sub> in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Σ
L <sub>WA, Abgasmündung</sub> in dB(A)	133	125	124	130	137	131	125	110	140
Forderung L <sub>WA</sub> in dB(A)	91	88	88	85	78	78	78	78	95
Anforderung an den SD	<b>42</b>	37	36	45	<b>59</b>	<b>53</b>	47	32	45

Aus der Tabelle 4 ist zu erkennen, dass sich für diese Konstellation nur der Einsatz eines zusätzlichen Resonanzschalldämpfers (zum Standart-Absorptionsschalldämpfer) bzw. ein kombinierter Absorptions-Resonanz-Schalldämpfers eignet, um die in einer Schallimmissionsprognose geforderten, maximal zulässigen Schalleistungspegel an der Kaminmündung einzuhalten.

Mit diesen im Vorfeld der Errichtung des BHKWs bekannten Emissionsdaten können so die geeigneten Schallschutzmaßnahmen abgeleitet und gesondert Forderungen für den tieffrequenten Lärmschutz formuliert werden.

Für den Fall, dass die Emissionsdaten eines zum Einsatz kommenden Verbrennungsmotors nicht verfügbar sind, können mit den Ausführungen im nächsten Punkt dennoch Forderungen bezüglich des (tieffrequenten) Schallschutzes getroffen werden.



## 7 Formulierung spezifischer Nebenbestimmungen zum tieffrequenten Lärmschutz

In diesem Punkt sollen spezifische Nebenbestimmungen bezüglich der dominant tieffrequenten Schall emittierenden Schallquelle – des Abgaskamins – formuliert werden. Die Notwendigkeit der Aufnahme dieser Nebenbestimmungen in einen Genehmigungsbescheid beruht auf der Einhaltung des Immissionsrichtwertes (IRW) bzw. der Anhaltswerte der DIN 45680 (siehe Tabelle 1 und 2 im Punkt 2.3) für die schutzbedürftige Wohnbebauung.

Zunächst soll die Frage geklärt werden, inwiefern durch die Wahl von verschiedenen Messpunkten im Einwirkungsbereich eines BHKWs ein Nachweis auf Einhaltung des IRW bzw. der AHWs für die schutzbedürftigen Wohnnutzungen geführt werden kann.

Anhand des folgenden Beispiels soll dies erläutert werden:

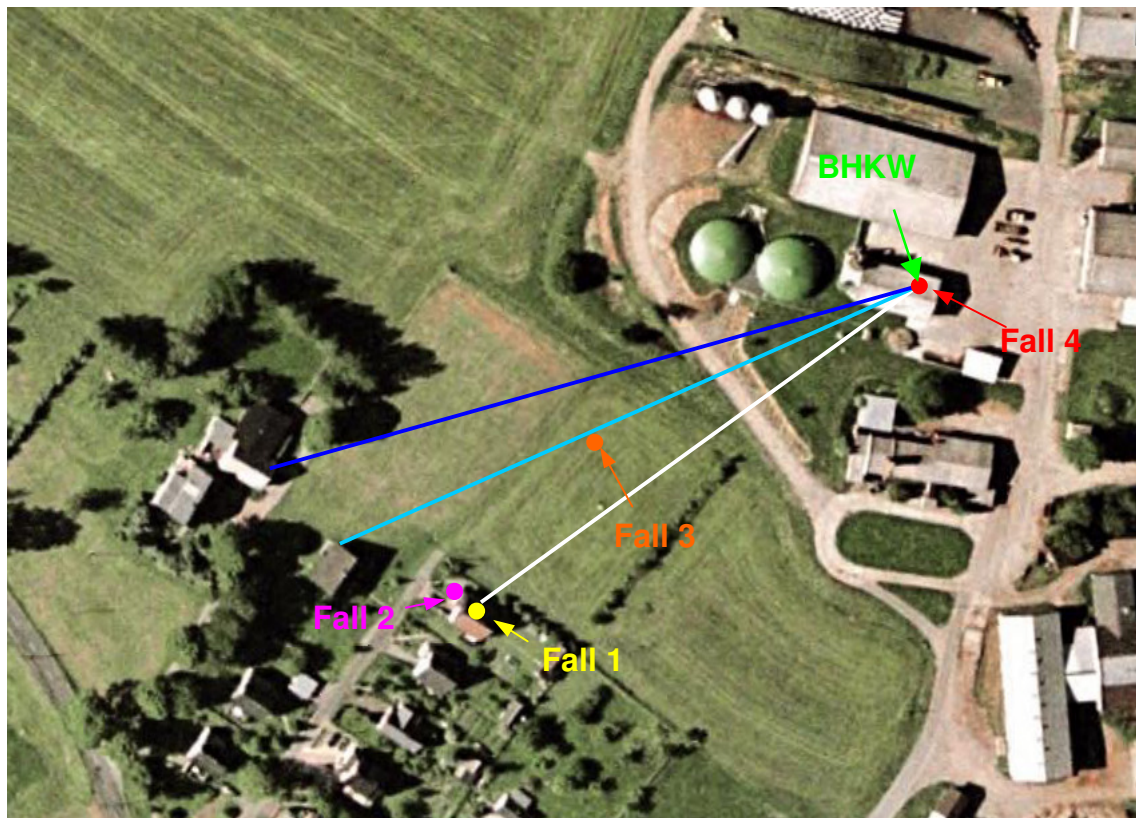


Abbildung 43: Messbeispiel BHKW, Maßstab 1 :21 000

Im Einwirkungsbereich eines BHKW befinden sich drei schutzbedürftige Wohnnutzungen in verschiedenen Winkeln zum Abgaskamin in einem Abstand von  $s_1 = 150$  m (weiße Linie),  $s_2 = 175$  m (hellblaue, mittlere Linie) und  $s_3 = 187$  m (dunkelblaue Linie).

Für den Fall 1 soll eine Immissionsmessung am nächstgelegenen Wohngebäude (0,5 m vor dem geöffneten Fenster) und im Wohnraum durchgeführt werden. Für den 2. Fall soll ein Messbeispiel am nächstgelegenen Wohngebäude (Ersatzmessort außerhalb des Gebäudes, z.B. neben dem Gebäude) erläutert werden. Der Fall 3 bezieht sich auf Schallpegelmessungen an einem Ersatzmessort in  $s \approx 90$  m Abstand vom Abgaskamin (in rund dem halben Abstand vom Kamin zu den Wohngebäuden). Im letzten 4. Fall soll eine Emissionsmessung im Nahbereich des Abgaskamin des BHKWs betrachtet werden.

### **Fall 1:**

Es werden Schallpegelmessungen an bzw. in der am nächsten gelegenen Wohnbebauung nach TA Lärm bzw. DIN 45680 durchgeführt. Die Auswertung der Messergebnisse ergibt eine Einhaltung des IRWs (A-bewertet) bzw. der AHWs (nach DIN 45680). Aus dieser Einhaltung wird geschlussfolgert, dass durch den Betrieb des BHKWs schädliche Umwelteinwirkungen in Form von Lärm für die nächstgelegene Wohnnachbarschaft (die Gebäude, die sich jeweils am Ende der beiden blauen Linien befinden) ausgeschlossen werden können.

Diese Formulierung beinhaltet jedoch einen **Trugschluss**.

Durch die im Punkt 4.7 genannten **drei Unsicherheitsfaktoren**, der geringen Schalldämmung von Fenstern bei tiefen Frequenzen, der Entstehung von Raumresonanzen und der Druckstau vor der Hausfassade, **die für jedes Wohnhaus unterschiedlich** sind, kann nicht von dem dem BHKW am nächsten gelegenen Wohngebäude auf ein z.B.  $s = 25$  m entfernt liegendes Wohnhaus geschlossen werden. Für den Fall, dass dieses weiter entfernte Wohnhaus sich auf einer „lauten Richtung“ befindet, einfachverglaste Fenster

besitzt und auch noch die Raumabmessungen eines zum BHKW zeigenden Schlafraumes die Entstehung von stehenden Wellen begünstigen, können schädliche Umwelteinwirkungen in Form von Lärm für die nächstgelegene Wohnnachbarschaft **nicht** ausgeschlossen werden.

### **Fall 2:**

Es werden Schallpegelmessungen an einem Ersatzmessort an der nächstgelegenen Wohnbebauung durchgeführt.

Für diese Messung existieren die gleichen Unsicherheitsfaktoren wie für den Fall 1. Wenn der gewählte Messpunkt neben dem Wohnhaus auf einer „leisen Richtung“ (siehe MS 4 in Abb. 19) liegt, können sich im Gegensatz zu einer „lauten Richtung“ (siehe MS 3 in Abb. 19) Pegelunterschiede von bis zu 10 dB ergeben.

### **Fall 3:**

Es werden Schallpegelmessungen an einem Ersatzmessort durchgeführt. Der Abstand zum Abgaskamin des BHKWs beträgt  $s = 90$  m. Entlang dieses Radius wird die lauteste der drei eingezeichneten Linien gewählt – um den ungünstigsten Fall zu beleuchten. Durch Messungen an diesem gewählten Ersatzmessort sollen dann Aussagen über die Schalleinwirkung an den drei nächstgelegenen Wohngebäuden getroffen werden (durch Anwendung des Abstandsgesetzes).

Diese geschilderte Messung impliziert jedoch einen **großen Fehler**.

Wird für diesen Fall die Abbildung 20 betrachtet, so ergeben sich im gesamten Messbereich erhebliche Pegelunterschiede für die beiden dargestellten Messhöhen, die auf Interferenzerscheinungen durch Reflexion der tieffrequenten Schallwellen an den Begrenzungsflächen der dem BHKW nahe liegenden Gebäuden und dem Boden entstehen. Diese Erscheinungen können sich jedoch noch verstärken, wenn sich in der Nähe des gewählten Ersatzmessortes noch weitere Begrenzungsflächen befinden würden.

Demzufolge ist dieser Messort am wenigsten geeignet, um Schallpegelmessungen an BHKWs durchzuführen.

**Fall 4:**

Es werden Schallpegelmessungen im Nahbereich des Abgaskamins durchgeführt, wie sie in der vorliegenden Diplomarbeit durchgeführt wurden.

Aufgrund der dabei gewonnenen Erkenntnisse im Nahbereich ( $1\text{ m} < s < 2\text{ m}$ ) des Abgaskamins von BHKWs können nur dort die verlässlichsten Aussagen zu dessen Schallemission getroffen werden, da hier Interferenzeffekte noch nicht zum Wirken kommen, wie es im Bereich ab  $s > 2\text{ m}$  der Fall ist.

Da der Nahbereich des Abgaskamins den geeignetsten Messort darstellt, müssen die Nebenbestimmungen deshalb speziell für diesen Nahbereich formuliert werden.

**Formulierung von Nebenbestimmungen**

Als Grundlage der Formulierung der spezifischen Nebenbestimmungen dient die im Vorfeld der Errichtung einer BHKW-Anlage rechnerisch erstellte Schallimmissionsprognose. Aus dieser Prognose ergibt sich zunächst ein **maximal zulässiger A-bewerteter Schallleistungspegel  $L_{WA}$** . Dieser Schallleistungspegel findet aktuell in allen Nebenbestimmungen Berücksichtigung. Darüber hinaus müssen neben dem A-bewerteten Schallleistungspegel aber auch die tieffrequenten Spektralanteile getrennt berücksichtigt werden, da diese Anteile durch die A-Bewertung sehr stark gedämpft werden (siehe Ausführungen im Punkt 2.3). Deshalb müssen in einer Schallimmissionsprognose die Eigenschaften der tieffrequenten Geräuschemission getrennt von der normalen A-Bewertung Berücksichtigung finden. /1/ In einer Schallimmissionsprognose muss deshalb **zusätzlich** zum A-bewerteten Schallleistungspegel  $L_{WA}$  speziell auf die zu erwartende tieffrequente Schallabstrahlung des Abgaskamins, in Form von **maximal zulässigen Terz-Schallleistungspegeln an der Kaminmündung des Abgaskamins für den tieffrequenten Bereich ( $f < 90\text{ Hz}$ )**, eingegangen werden.

Die spezifischen Nebenbestimmung, die in dem Genehmigungsbescheid des BHKWs zwingend festzusetzen wären, sollten auf Grundlage dieser maximal zulässigen Terz-Schallleistungspegel folgendermaßen formuliert werden:

### **Nebenbestimmung 1**

**„Der Schallschutz an der BHKW-Abgasanlage ist so auszulegen, dass die nach Tabelle 5 geforderten maximal zulässigen linearen Terz-Schallleistungspegel eingehalten werden.“**

Tabelle 5: Beispiel für die in den Nebenbestimmungen anzugebende Tabelle der maximal zulässigen linearen Terz-Schallleistungspegel des Abgaskamins in den für BHKWs relevanten Terzmittenfrequenzen

$f_{\text{Terz}}$ in Hz	40	50	63	80	100
$L_{w,\text{Lin,Abgasmündung}}$ in dB	101,5	94	87	81,5	77

### **Hinweis**

„Um die nach Tabelle 5 geforderten Terz-Schallleistungspegel einzuhalten, wird der Einsatz eines zusätzlichen **Resonanz-Schalldämpfers** in die Abgasstrecke des BHKWs empfohlen.“

### **Nebenbestimmung 2**

**„Nach Inbetriebnahme der Anlage ist die Einhaltung der maximal zulässigen linearen Terz-Schallleistungspegel nach Tabelle 5 am Abgaskamin des BHKWs nachzuweisen“.**

Eine Empfehlung, wie dieser Nachweis auf Grundlage der erhobenen Messdaten im Punkt 4 erfolgen kann, soll im Punkt 8 beschrieben werden.

## 8 Anleitung zur Durchführung von Inbetriebnahmemessungen

Wie im Punkt 7 gefordert, soll nach der Errichtung des BHKWs eine Inbetriebnahmemessung durchgeführt werden, die die Einhaltung der in den Nebenbestimmungen geforderten maximal zulässigen Terz-Schallleistungspegel am Abgaskamin des BHKWs nachweisen soll. Die durchzuführenden Messungen sind dabei im Vorfeld mit der zuständigen Immissionsschutzbehörde abzustimmen. Ein Vorschlag wie eine Inbetriebnahmemessung am geeignetsten durchzuführen wäre, sollen die folgenden Ausführungen beschreiben.

Da sich infolge von Interferenzerscheinungen durch die tieffrequente Schallemission des Abgaskamins von BHKWs und den damit verbundenen ortsabhängigen Schalldruckpegelschwankungen die Nachweisführung der in den Nebenbestimmungen geforderten maximal zulässigen tieffrequenten Emission der Kaminöffnung in Zuge der Inbetriebnahmemessung als ungenau erwies, wurden im Rahmen der Diplomarbeit Schallpegelmessungen an vier BHKW-Anlagen durchgeführt. Die Messungen im Nahbereich der Kaminmündung konnten den idealen Messbereich auf einen bis maximal zwei Meter Abstand waagrecht zur Mitte des Kamins einschränken. Für die Durchführung von Inbetriebnahmemessungen am Abgaskamin von BHKWs wird deshalb folgendes Vorgehen vorgeschlagen:

### **Schritt 1:**

Die Messungen sind in zwei verschiedenen Abständen  **$s = 1\text{ m}$  und  $s = 2\text{ m}$**  **horizontal zur Kaminmündung** (in Höhe des Kamins) unbewertet (linear) in Terzbändern ( $L_{\text{Terz,Lin,eq}}$ ) durchzuführen. Eine Messzeit pro Abstand von  $t_{\text{Mess}} = 30\text{ s}$  ist aufgrund des stationären Geräuschcharakters ausreichend.

### **Hinweis:**

*Es sollte eine Messrichtung vom Abgaskamin gewählt werden, in welcher der maximal mögliche Abstand zu nahe gelegenen reflektierenden Flächen eingehalten wird, um den Einfluss etwaiger Interferenzeffekte auf die Messwerte zu vermeiden.*



**Schritt 2:**

Aus den Messwerten der beiden Abstände ist unter Anwendung der GL 3.11 der **Schallleistungspegel** für die interessierenden **tieffrequenten Terzmittenfrequenzen** ( $f_{\text{Terz}} < 90 \text{ Hz}$ ) zu bilden. Dabei ist der höhere der beiden Schallleistungspegel zu berücksichtigen.

$$L_w = L_p + 20 \cdot \log\left(\frac{s}{s_0}\right) + 8 \text{ dB} \quad [\text{GL 3.11}]$$

**Anmerkung:**

*Es sei bemerkt, dass für die physikalisch exakte Berechnung des Schallleistungspegels aus dem Nahfeld eigentlich der Vollraum anzusetzen wäre ( $K_0 = 0 \text{ dB}$  in GL 3.10), da der tieffrequente Schall gut um den Kamin gebeugt und so im Nahbereich des Kamins in den Vollraum abgestrahlt wird. Allerdings ist die Berechnung des terzbezogenen Schallleistungspegels mit Berücksichtigung des Vollraums eher unzuverlässig, da für die einfache Berechnung eines Schalldruckpegels an einem Immissionsort nach dem Abstandsgesetz für die üblichen Abstände des BHKWs zu den Immissionsorten **immer der Halbraum** zum Wirken kommt. Um die Gleichung GL 3.11 nicht zu verkomplizieren wurde deshalb die Berechnung des Schallleistungspegels anhand des Halbraums vorgenommen.*

**Schritt 3:**

Die berechneten Werte sind mit den in den Nebenbestimmungen festgelegten maximal zulässigen Terz-Schallleistungspegeln zu vergleichen.

**Hinweis zur Berechnung eines Schalldruckpegels am Immissionsort:**

Die **Abschätzung** der zu erwartenden Schalldruckpegel am Immissionsort kann für die vorliegenden tieffrequenten Schallanteile unter Berücksichtigung des errechneten Schallleistungspegels  $L_w$  nach Gleichung GL 3.11, des Abstandes zum Immissionsort  $s$  und unter Berücksichtigung der Pegelerhöhung durch den Laufzeitunterschied des Direktschalls mit den am Boden reflektierten tieffrequenten Schallwellen (im Fernfeld maximal **6 dB**, siehe GL 3.12 bzw. Abb. 19) mit folgender Gleichung durchgeführt werden:

$$L_{p,IO} = L_W - 20 \cdot \log\left(\frac{s}{s_0}\right) - 8dB + 6dB$$
$$L_{p,IO} = L_W - 20 \cdot \log\left(\frac{s}{s_0}\right) - 2dB$$

[GL 8.1]

Durch diese Gleichung können Abschätzungen bezüglich des am Immissionsort vorherrschenden Schalldruckpegels „auf der sicheren Seite“ für die Anwohner getroffen werden.

#### 4.1 Unterschreitung der Terz-Schallleistungspegel

Im Falle einer korrekt durchgeführten Schallimmissionsprognose, in welcher die besonderen Eigenschaften tieffrequenter Schallausbreitung mit beachtet wurden, sind keine Überschreitungen des Immissionsrichtwertes bzw. der Anhaltswerte der DIN 45680 der schutzbedürftigen Bebauung zu erwarten.

**Anmerkung:** Sollten wider Erwarten Lärmbeschwerden durch nahe gelegene Anwohner vorgetragen werden, so ist das weitere Vorgehen mit der zuständigen Immissionsschutzbehörde abzustimmen.

#### 4.2 Überschreitung der Terz-Schallleistungspegel

**a)** Im Falle es liegt eine Überschreitung der in den Nebenbestimmungen der Genehmigung geforderten maximal zulässigen Terz-Schallleistungspegel vor, so muss in Abstimmung mit der Behörde das weitere Vorgehen besprochen werden.

**b)** Werden die maximal zulässigen Terz-Schallleistungspegel überschritten und werden **Lärmbeschwerden** durch nahe gelegene Anwohner vorgetragen, so ist es zwingend erforderlich, Messungen in den jeweiligen Wohngebäuden durchzuführen.



## 5. Bewertung der Messergebnisse ermittelt in der schutzbedürftigen Wohnnachbarschaft

- a) Für den Fall der **Überschreitung** der Anhaltswerte nach Tabelle 1 & 2 müssen vom Betreiber **weitere Schallschutzmaßnahmen** (siehe Punkt 6) realisiert werden.
- b) Für den Fall der **Unterschreitung** der Anhaltswerte nach Tabelle 1 & 2 müssen **keine weiteren Schallschutzmaßnahmen** durchgeführt werden.

## 9 Zusammenfassung

Mit der Aufnahme der beiden in Punkt 7 formulierten Nebenbestimmungen in den von der Genehmigungsbehörde erstellten Genehmigungsbescheiden für den Betrieb eines Blockheizkraftwerkes wird eine Festlegung bezüglich der Begrenzung der tieffrequenten Geräuschemission an der dominierend tieffrequent schallemittierenden Quelle – des Abgaskamins – getroffen. Somit können dem Anlagenbetreiber Vorgaben bezüglich des tieffrequenten Lärmschutzes erteilt werden (z.B. in Form eines zusätzlichen, wirksamen Resonanzschalldämpfers in die Abgasstrom des BHKWs), die nach Inbetriebnahme der Anlage zu einer Einhaltung der Immissionsrichtwerte nach TA Lärm bzw. der Anhaltswerte nach DIN 45680 an bzw. in der schutzbedürftigen Wohnnachbarschaft führen sollten.

Mit der in der 2. Nebenbestimmung geforderten Durchführung der Inbetriebnahmemessung kann der Nachweis der Wirksamkeit der realisierten Schallschutzmaßnahmen erbracht werden und ggf. Nachbesserungen gefordert werden.

## Literaturverzeichnis

- /1/ Plietz, Ines: Gegenüberstellung theoretisch erwartbarer und messtechnisch erhobener Eigenschaften tieffrequenter Schallausbreitung im Freifeld – untersucht an Beispielen emittierter 75-Hz-Schallwellen aus Blockheizkraftwerken (BHKW) von Biogasanlagen, Hochschule Mittweida (FH), Fachbereich MPI, Diplomarbeit, 2007
- /2/ Kubicek, Rainer: Thema, Problem und Zielstellung der Diplomarbeit, Dezember 2008
- /3/ Kubicek, Rainer: Vorkommen, Messung Wirkung und Bewertung von extrem tieffrequentem Schall einschließlich Infraschall in der kommunalen Wohnumwelt, Zwickau, Technische Hochschule, Dissertation A, 1989
- /4/ Kubicek, Rainer: Schutz vor tieffrequenten Geräuschen – Anforderungen an Messung und Beurteilung, Reinhardtsgrimma, Vortrag, Dezember 2003
- /5/ Henn, Hermann; Sinambari, Gholam Reza; Fallen, Manfred: Ingenieurakustik, Grundlagen, Anwendungen, Verfahren, 4. Auflage, Kapitel 2, 3, 9, 10, 11, Verlag: Vieweg + Teubner, 2008
- /6/ Kubicek, Rainer: Beurteilung von tieffrequenten Geräuschemissionen in der Nachbarschaft unter Anwendung der gültigen DIN 45680 mit Beiblatt 1 der DIN 45680) - Hinweise zur Erstellung von Schallimmissionsprognosen, 11. Chemnitzer Fachseminar Schall-Immissionsschutz 03./04.11.2008 der IHK Südwestsachsen
- /7/ Fuchs, Helmut V.: Schallabsorber und Schalldämpfer, Innovative akustische Konzepte und Bauteile mit praktischen Anwendungen in konkreten Beispielen, 2., wesentlich erweiterte und bearbeitete Auflage, Springer Verlage, 2007
- /8/ Lips, Walter: Lärmbekämpfung in der Haustechnik, Anleitung für Planung, Dimensionierung, Einbau und Betrieb von lärmarmen haustechnischen Installationen und Anlagen, 3., aktualisierte Auflage, expert verlag, 2003
- /9/ Norm DIN EN ISO 11820: Messungen an Schalldämpfern im Einsatzfall, April 1997
- /10/ DEGA-Projekt „Akustische Wellen und Felder“, 2003
- /11/ Norm DIN 45680: Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschemissionen in der Nachbarschaft, März 1997

- /12/ Lewke, Hermann: Durchführung von Schallmessungen für die Biogasanlage in Güstrow, Güstrow, Vortrag, April 2009
- /13/ Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm), vom 26.08.1998
- /14/ Schirmer, Werner: Lärmbekämpfung, Maßnahmen an Maschinen und in Produktionsstätten zum Schutz des Menschen vor Lärm und Schwingungen, 1. Auflage, Verlag Tribüne Berlin, 1989
- /15/ Schallschutzgutachten der Fa. Ingenieurbüro für Lärmschutz Förster & Wolgast, Nr. 15808, 2008

### **Internetquellen**

- /16/ <http://www.kutzner-weber.de>, verfügbar am 24.06.2009
- /17/ Google Earth, Version 4.0.2737, Stand: 31.01.2007
- /18/ [http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw1\\_ge/kap\\_2/illustr/interferenz.gif](http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw1_ge/kap_2/illustr/interferenz.gif), verfügbar am 24.06.2009
- /19/ [http://osiris2.pi-consult.de/userdata/l\\_2/p\\_25/library/data/fs-05-136-aknir\\_infraschall.pdf](http://osiris2.pi-consult.de/userdata/l_2/p_25/library/data/fs-05-136-aknir_infraschall.pdf), verfügbar am 24.06.2009
- /20/ [http://www.buerger-fuer-eggebek.de/downloads/schnapp/RKI\\_InfraSchall.pdf](http://www.buerger-fuer-eggebek.de/downloads/schnapp/RKI_InfraSchall.pdf), verfügbar am 24.06.2009
- /21/ <http://www.ikz.de/1996-2005/2001/23/0123038.php>, verfügbar am 25.06.2009
- /22/ <http://www.umweltbundesamt.de/laermprobleme/publikationen/infraschall.pdf>, verfügbar am 15.07.2009
- /23/ <http://www.renewable-energy-concepts.com>, verfügbar am 15.07.2009
- /24/ <http://www.bhkw-anlagen.com>, verfügbar am 15.07.2009
- /25/ [http://www.ses-bhkw.de/assets/images/BHKW\\_Schema.jpg](http://www.ses-bhkw.de/assets/images/BHKW_Schema.jpg), verfügbar am 11.08.2009
- /26/ <http://www.seva.de/containerbauweise.htm>, verfügbar am 15.07.2009

## **Anlagenverzeichnis**

Anlage (1): BHKW in Containerbauweise

Anlage (2): Verbrennungsmotoren der ausgemessenen BHKWs

Anlage (3): Auswertung eines Terzfrequenzspektrums nach DIN 45680

Anlage (4): A- und C-Bewertungsfilter,  $K_{AI}$

Anlage (5a): Schallausbreitung einer Punktquelle mit zunehmender Entfernung

Anlage (5b): Interferenzarten

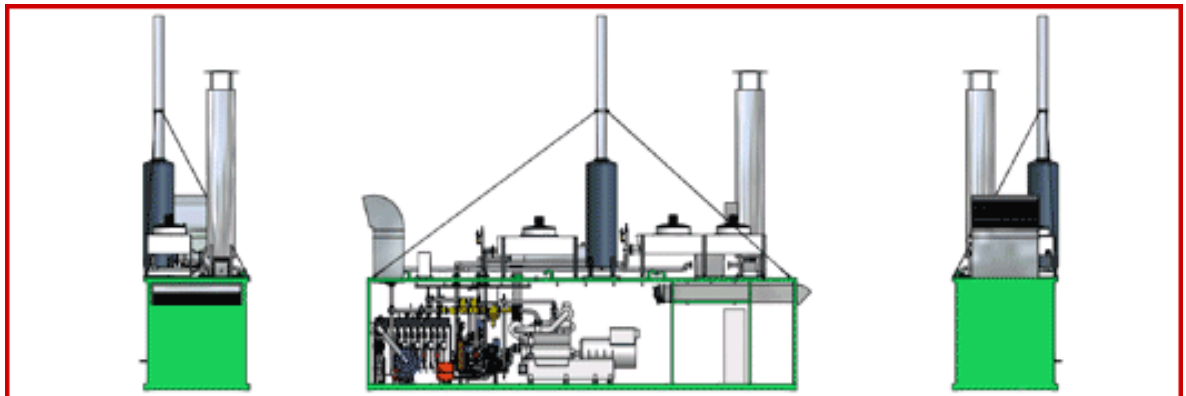
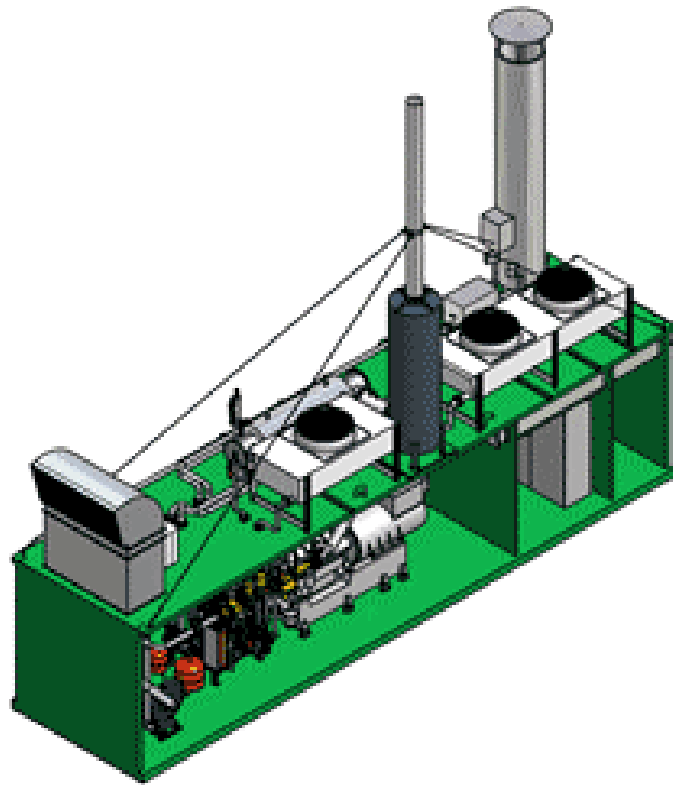
Anlage (6): Messergebnisse des BHKWs in Langenberg

Anlage (7): Messergebnisse des BHKWs in Oberbobritzsch

Anlage (8): Messergebnisse des BHKWs in Lichtenberg

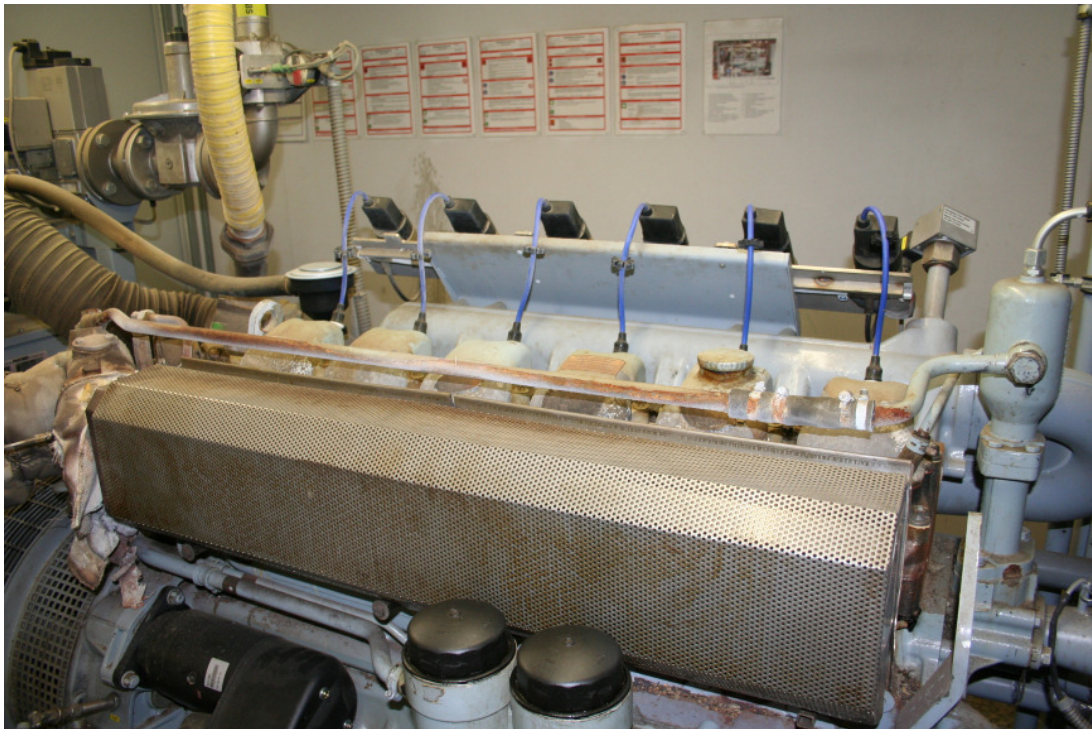
Anlage (9): Messergebnisse des BHKWs in Reinhardtsdorf

Anlage (10): Messergebnisse Schallpegeldifferenz außen-innen für tiefe  
Frequenzen ( $f < 100 \text{ Hz}$ )



Anlage (1): BHKW in Containerbauweise /26/



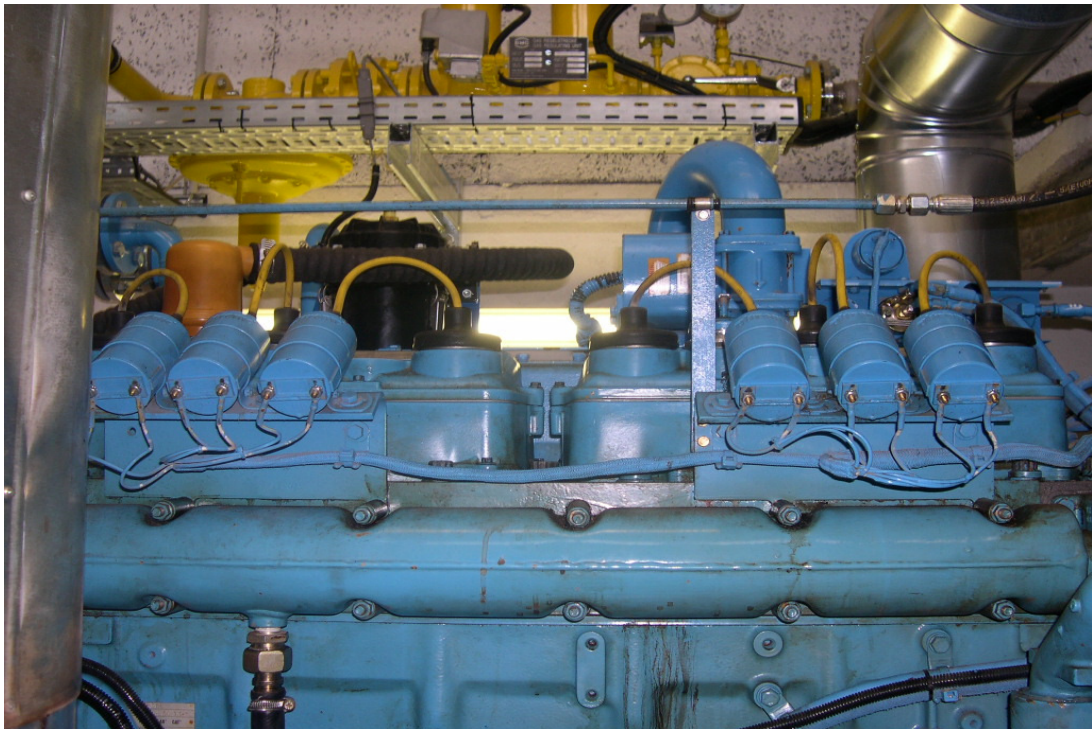


Anlage (2a): Verbrennungsmotor mit 6 in Reihe angeordneten Zylindern  
der Fa. MAN (BHKW in Langenberg)



Anlage (2b): Verbrennungsmotor mit 12 Zylindern in V-Form  
der Fa. MAN (BHKW in Oberbobritzsch)





Anlage (2c): Verbrennungsmotor mit 6 in Reihe angeordneten Zylindern  
der Fa. Caterpillar (BHKW in Lichtenberg)



Anlage (2d): Verbrennungsmotor mit 12 Zylindern in V-Form der Fa. MAN  
(BHKW in Reinhardtsdorf)

Terzmittenfrequenz in Hz	Pegel $L_{HS}$ in dB (nach DIN 45630-2)	$L_{Terz,r}$ in dB	$L_{Terz,r} - L_{HS}$ in dB
8	103	98	-5
10	95	94	-1
12,5	87	86	-1
16	79	76	-3
20	71	67	-4
25	63	60	-3
31,5	55,5	50	-5,5
40	48	52	4
50	40,5	41	0,5
63	33,5	35	1,5
80	28	40	12
100	23,5	26	2,5

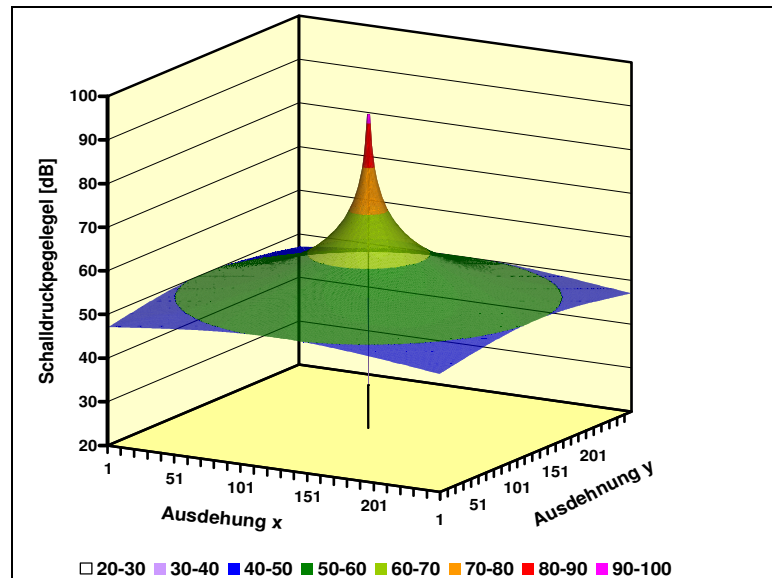
Anlage (3): Auswertung eines Terzfrequenzspektrums nach DIN 45680

- mit **geringer Überschreitung** und **hoher Überschreitung**  
**(tonale Komponente)** des Hörschwellenpegels -

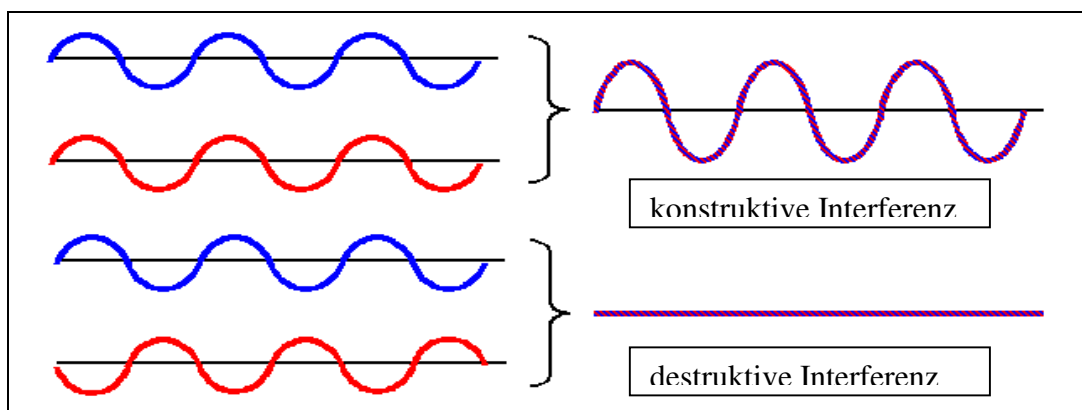


Frequenz in Hz	A-Bewertung	C-Bewertung
8	-77,6	-17,6
10	-70,4	-14,3
12,5	-63,6	-11,3
16	-56,4	-8,4
20	-50,4	-6,2
25	-44,8	-4,4
31,5	-39,5	-3,0
40	-34,5	-2,0
50	-30,3	-1,3
63	-26,2	-0,8
80	-22,4	-0,5
100	-19,1	-0,3
125	-16,2	-0,2
160	-13,2	-0,1
200	-10,8	0,0
250	-8,7	0,0
315	-6,6	0,0
400	-4,8	0,0
500	-3,2	0,0
630	-1,9	0,0
800	-0,8	0,0
1000	0,0	0,0
1250	0,6	0,0
1600	1,0	-0,1
2000	1,2	-0,2
2500	1,3	-0,3
3150	1,2	-0,5
4000	1,0	-0,8
5000	0,6	-1,3
6300	-0,1	-2,0
8000	-1,1	-3,0
10000	-2,5	-4,4
12500	-4,2	-6,2
16000	-6,7	-8,6
20000	-9,3	-11,3

Anlage (4): A- und C-Bewertungsfiler,  $K_{Ai}$

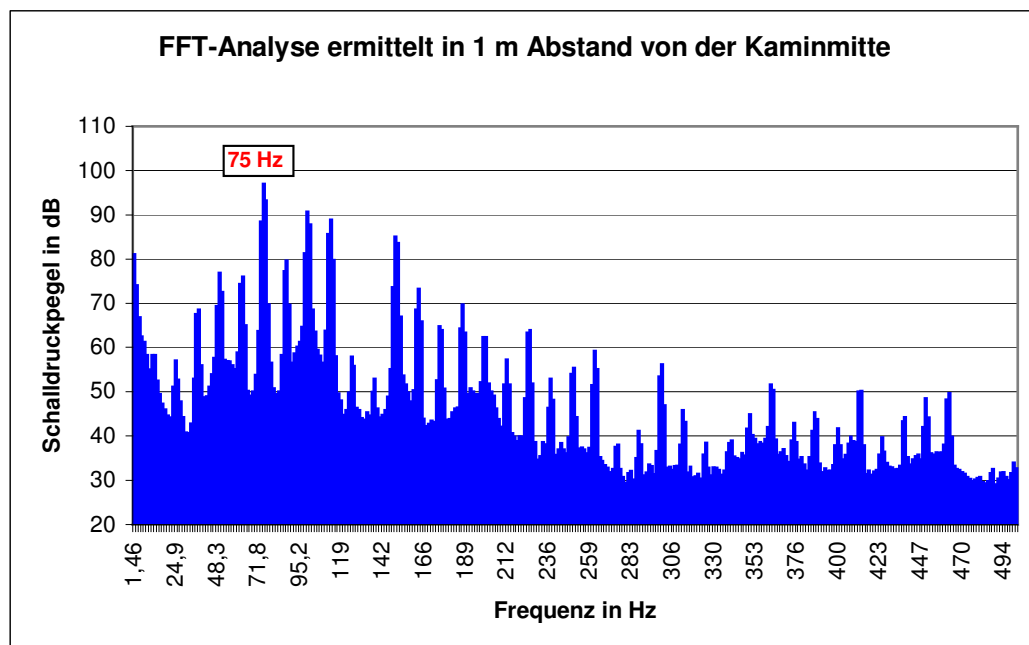


Anlage 5 a) Schallausbreitung einer Punktquelle mit zunehmender Entfernung /1/



Anlage 5 b): Interferenzarten /18/

## Anlage (6): Messergebnisse des BHKWs in Langenberg



## Messprotokoll

Ort / Messobjekt: BHKW in Langenberg

Datum: 19.05.2009

Messzeit: 09:00 bis 14:15

Bediener; verwendete Messtechnik:

Dr. Kubicek: Nor 110 (1m Höhe), Nor 121 (4m Höhe)

T. Tröger, A. Förster: Nor 121 (12 m Höhe)

unbesetzt: Nor 110 (Referenzmesspunkt)

Messgrößen:  $L_{80\text{Hz,eq}}$ ,  $L_{\text{Terz,eq}}$

Mittelungszeit je Messwert: 15 s

Meteorologische Bedingungen:

sonnig bis leicht bewölkt,

von 9 bis 13 Uhr kein Wind; gegen 13 Uhr leicht aufkommender Wind aus

Richtung West, der bis zur Ende der Messung anhielt

Bemerkungen:

Messgerät Nor121 wurde im Nahbereich auf 120 dB Endausschlag eingestellt

Motortyp: MAN 2876 LE 302 (R6)

$d_{\text{Kamin}} = 12 \text{ cm}$

### **Messstrahl 1: in Richtung Südost für 1 m Höhe**

Messabstand in m	Messwert $L_{80\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerk- ungen	Messabstand in m	Messwert $L_{80\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerk- ungen
3,00	77,6		12,00	65,5	
3,50	77,7		12,50	71,3	
4,00	77,2		13,00	73,5	
4,50	77,9		13,50	74,2	
5,00	78,3		14,00	73,7	
5,50	77,1		14,50	72,2	
6,00	75,1		15,00	68,3	
6,50	75,0		15,50	66,6	
7,00	77,2		16,00	66,0	
7,50	78,0		16,50	71,0	
8,00	78,1		17,00	74,9	
8,50	76,1		17,50	76,5	
9,00	71,3		18,00	76,4	
9,50	69,7		18,50	76,9	
10,00	72,6		19,00	74,1	
10,50	73,2		19,50	72,1	
11,00	70,5		20,00	71,3	
11,50	61,8				

### **Messstrahl 1: in Richtung Südost für 4 m Höhe**

Messabstand in m	Messwert $L_{80\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerk- ungen	Messabstand in m	Messwert $L_{80\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerk- ungen
3,00	76,3		12,00	85,0	
3,50	76,3		12,50	83,9	
4,00	79,4		13,00	83,4	
4,50	81,2		13,50	83,5	
5,00	82,1		14,00	83,9	
5,50	80,0		14,50	84,3	
6,00	79,8		15,00	84,2	
6,50	79,9		15,50	84,0	
7,00	81,6		16,00	83,7	
7,50	83,0		16,50	82,6	
8,00	84,0		17,00	81,3	
8,50	84,2		17,50	80,4	
9,00	83,9		18,00	79,7	
9,50	84,0		18,50	80,3	
10,00	85,4		19,00	80,4	
10,50	85,4		19,50	80,4	
11,00	85,5		20,00	80,3	
11,50	85,6				

### Messstrahl 1: in Richtung Südost für 12 m Höhe

Messabstand in m	Messwert $L_{80\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerkungen	Messabstand in m	Messwert $L_{80\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerkungen
0,25	109,1		8,00	86,3	
0,50	103,5		8,50	85,9	
0,75	102,1		9,00	85,7	
1,00	100,1		9,50	83,9	
1,25	100,1		10,00	74,2	Asphaltiert
1,50	98,6		10,50	77,2	
1,75	96,9		11,00	75,6	
2,00	93,6		11,50	75,6	
2,25	93,2		12,00	72,8	
2,50	91,7		12,50	71,7	
2,75	90,5		13,00	72,8	
3,00	88,6		13,50	73,8	
3,25	86,7		14,00	75,0	
3,50	86,8		14,50	76,7	
3,75	86,5		15,00	77,4	
4,00	86,3		15,50	78,6	
4,25	86,0		16,00	79,2	
4,50	86,2		16,50	79,3	
4,75	86,6		17,00	79,3	
5,00	86,6		17,50	79,0	
5,50	87,1		18,00	79,4	
6,00	87,1		18,50	79,9	
6,50	86,6		19,00	79,8	
7,00	86,2	100 dB Endausschlag	19,50	79,7	
7,50	85,9		20,00	79,4	

### **Messstrahl 2: in Richtung Süd für 1 m Höhe**

Messabstand in m	Messwert $L_{80\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerk- ungen	Messabstand in m	Messwert $L_{80\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerk- ungen
3,00	84,2		12,00	83,4	
3,50	83,5		12,50	83,4	
4,00	82,5		13,00	83,3	
4,50	81,9		13,50	82,8	
5,00	81,6		14,00	82,0	
5,50	82,3		14,50	81,0	
6,00	81,4		15,00	81,1	
6,50	80,4		15,50	81,7	
7,00	80,4		16,00	81,1	
7,50	80,1		16,50	81,4	
8,00	81,7		17,00	80,2	
8,50	81,2		17,50	79,2	
9,00	81,6		18,00	79,8	
9,50	81,0		18,50	80,6	
10,00	81,8		19,00	80,9	
10,50	82,3		19,50	79,9	
11,00	82,8		20,00	79,0	
11,50	83,2				

### **Messstrahl 2: in Richtung Süd für 4 m Höhe**

Messabstand in m	Messwert $L_{80\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerk- ungen	Messabstand in m	Messwert $L_{80\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerk- ungen
3,00	84,2		12,00	83,4	
3,50	83,5		12,50	83,4	
4,00	82,5		13,00	83,3	
4,50	81,9		13,50	82,8	
5,00	81,6		14,00	82,0	
5,50	82,3		14,50	81,0	
6,00	81,4		15,00	81,1	
6,50	80,4		15,50	81,7	
7,00	80,4		16,00	81,1	
7,50	80,1		16,50	81,4	
8,00	81,7		17,00	80,2	
8,50	81,2		17,50	79,2	
9,00	81,6		18,00	79,8	
9,50	81,0		18,50	80,6	
10,00	81,8		19,00	80,9	
10,50	82,3		19,50	79,9	
11,00	82,8		20,00	79,0	
11,50	83,2				

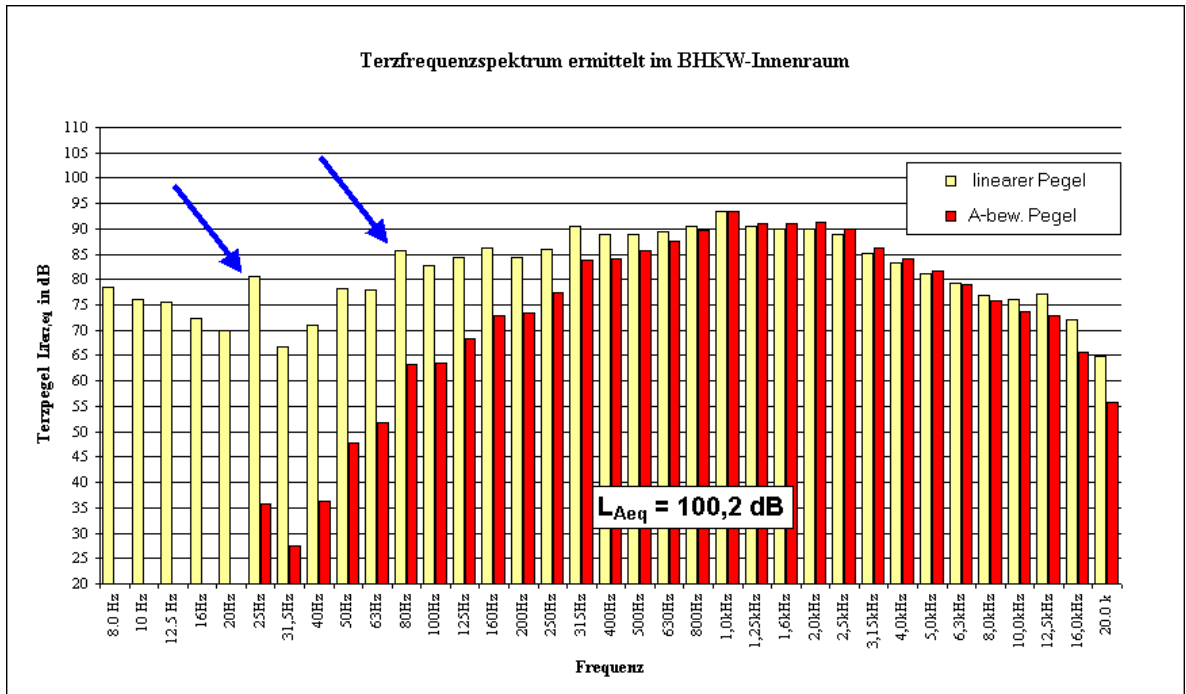
### Messstrahl 2: in Richtung Süd für 12 m Höhe

Messabstand in m	Messwert $L_{80\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerk- ungen	Messabstand in m	Messwert $L_{80\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerk- ungen
0,25	110,4		8,00	84,0	
0,50	105,8		8,50	83,2	
0,75	102,1		9,00	82,5	
1,00	101,0		9,50	80,3	
1,25	99,1		10,00	79,8	
1,50	98,2		10,50	79,2	
1,75	96,4		11,00	80,1	
2,00	94,9		11,50	78,9	
2,25	94,1		12,00	78,1	
2,50	93,0		12,50	77,4	
2,75	91,8		13,00	76,8	
3,00	90,9		13,50	76,8	
3,25	89,4		14,00	76,6	
3,50	89,6		14,50	76,8	
3,75	88,1		15,00	77,3	
4,00	86,2	100 dB Endausschlag	15,50	77,1	
4,25	86,0		16,00	77,6	
4,50	86,6		16,50	78,2	
4,75	85,5		17,00	78,8	
5,00	83,2		17,50	79,6	
5,50	81,2		18,00	79,8	
6,00	81,8		18,50	80,1	
6,50	81,1		19,00	80,6	
7,00	82,7		19,50	80,4	
7,50	83,7		20,00	79,9	

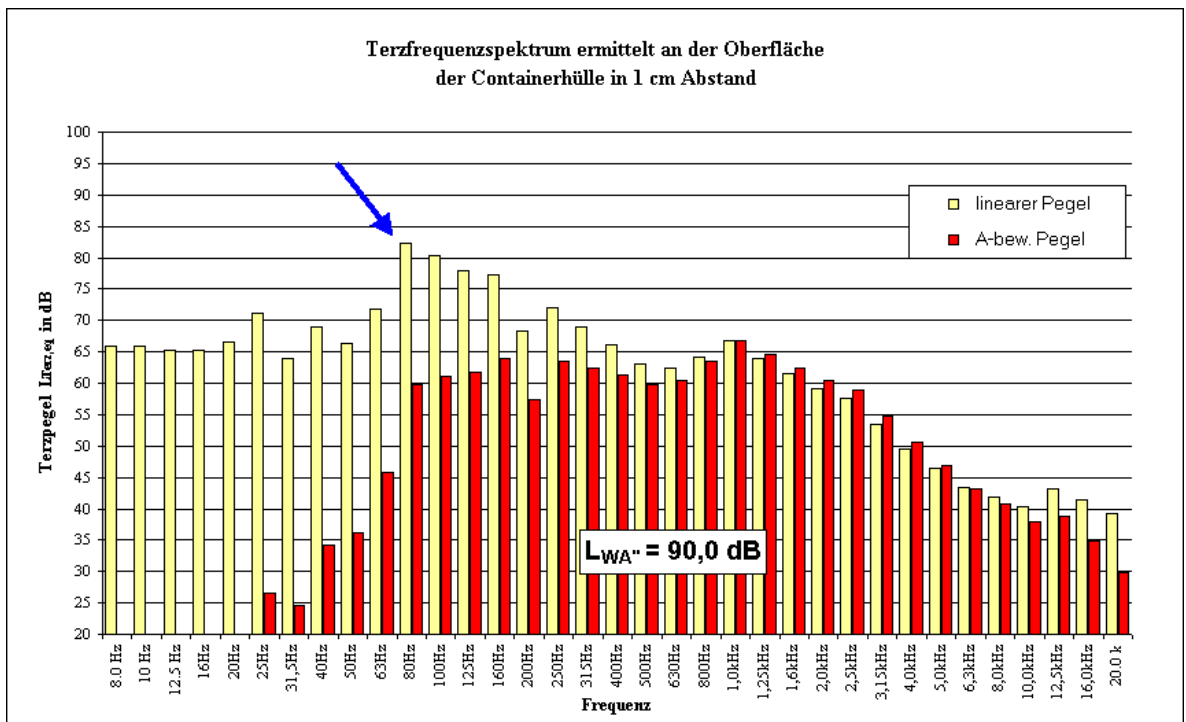


## Weitere Quellen tieffrequenter Schallabstrahlung

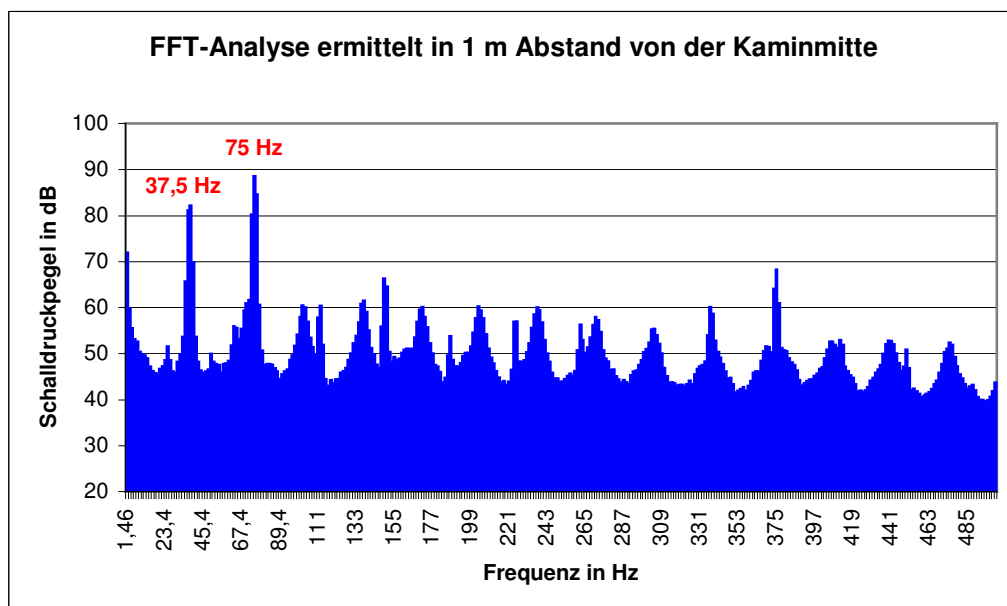
### Innenraumpegel



### Containerhülle



## Anlage (7): Messergebnisse des BHKWs in Oberbobritzsch



## Messprotokoll

Ort / Messobjekt: BHKW in Oberbobritzsch

Datum: 21.07.2009

Messzeit: 09:15 bis 13:00

Bediener; verwendete Messtechnik:

Dr. Kubicek: Nor 121

T. Tröger, A. Förster: Nor 121 (5,5 m Höhe)

unbesetzt: Nor 110 (Referenzmesspunkt)

Messgrößen:  $L_{80\text{Hz,eq}}$ ;  $L_{40\text{Hz,eq}}$ ;  $L_{\text{Terz,eq}}$

Mittelungszeit je Messwert: 20 s

Meteorologische Bedingungen:

leicht bewölkt bis bewölkt,

leichter Wind aus Richtung Südwest während der gesamten Messung

Bemerkungen:

Messgerät Nor121 wurde im Nahbereich auf 120 dB Endausschlag eingestellt

Motortyp: MAN D 2842 LE 202 V12

$d_{\text{Kamin}} = 16,5 \text{ cm}$

### Messstrahl 1: in Richtung Südsüdost für 5,5 m Höhe – 80 Hz Terz

Messabstand in m	Messwert $L_{80\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerk- ungen	Messabstand in m	Messwert $L_{80\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerk- ungen
0,25	110,0		10,50	81,8	
0,50	104,1		11,00	81,1	Endausschlag 100 dB
0,75	100,9		11,50	80,6	
1,00	99,4	Endausschlag 110 dB	12,00	80,4	
1,25	98,3	etwas Wind	12,50	81,0	
1,50	97,2		13,00	81,5	
1,75	96,8		13,50	80,9	
2,00	96,3		14,00	79,3	
2,25	95,7		14,50	78,7	etwas Wind
2,50	95,1		15,00	80,0	
2,75	94,7		15,50	81,0	
3,00	94,2		16,00	80,9	
3,25	93,1		16,50	79,8	
3,50	92,6		17,00	77,5	
3,75	91,2		17,50	75,8	
4,00	90,1		18,00	76,2	
4,25	88,6		18,50	76,8	
4,50	85,3		19,00	76,7	
4,75	83,0		19,50	75,4	
5,00	78,8		20,00	74,3	
5,50	71,4		20,50	73,5	
6,00	75,3		21,00	73,1	
6,50	80,2		21,50	73,2	
7,00	83,7		22,00	74,2	
7,50	84,8		22,50	73,9	
8,00	84,5		23,00	73,6	
8,50	83,9		23,50	68,8	
9,00	82,7		24,00	67,1	
9,50	81,0		24,50	68,2	
10,00	81,9		25,00	71,1	

### Messstrahl 1: in Richtung Südsüdost für 5,5 m Höhe – 40 Hz Terz

Messabstand in m	Messwert $L_{40\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerk- ungen	Messabstand in m	Messwert $L_{40\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerk- ungen
0,25	107,4		10,50	60,8	
0,50	99,2		11,00	55,6	Endausschlag 100 dB
0,75	95,4		11,50	55,4	
1,00	93,4	Endausschlag 110 dB	12,00	60,7	
1,25	91,8	etwas Wind	12,50	63,6	
1,50	90,4		13,00	66,0	
1,75	89,5		13,50	67,2	
2,00	88,5		14,00	68,0	
2,25	87,5		14,50	68,6	etwas Wind
2,50	86,7		15,00	69,2	
2,75	86,1		15,50	69,7	
3,00	85,2		16,00	69,9	
3,25	84,2		16,50	70,2	
3,50	83,8		17,00	70,5	
3,75	82,8		17,50	70,4	
4,00	82,3		18,00	70,2	
4,25	81,5		18,50	69,9	
4,50	80,0		19,00	69,8	
4,75	79,3		19,50	70,0	
5,00	78,4		20,00	70,7	
5,50	77,0		20,50	71,0	
6,00	75,5		21,00	71,4	
6,50	74,1		21,50	71,4	
7,00	72,4		22,00	71,3	
7,50	71,0		22,50	70,9	
8,00	70,0		23,00	70,6	
8,50	69,0		23,50	68,6	
9,00	68,0		24,00	68,1	
9,50	67,2		24,50	67,2	
10,00	64,8		25,00	66,1	

### **Messstrahl 2: in Richtung Süd für 5,5 m Höhe – 80 Hz Terz**

Messabstand in m	Messwert $L_{80\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerkungen	Messabstand in m	Messwert $L_{80\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerkungen
0,25	109,5		10,50	80,5	
0,50	103,5		11,00	80,3	
0,75	101,5		11,50	80,5	
1,00	100,1		12,00	79,7	
1,25	98,2	Endausschlag 110 dB	12,50	78,9	
1,50	97,2		13,00	78,5	
1,75	96,3		13,50	78,9	
2,00	95,6		14,00	78,4	
2,25	94,9		14,50	77,7	
2,50	94,3		15,00	77,4	
2,75	93,3		15,50	77,3	
3,00	92,1		16,00	76,0	
3,25	91,6		16,50	73,5	
3,50	90,3		17,00	71,6	
3,75	89,6		17,50	73,2	
4,00	88,8		18,00	74,4	
4,25	88,5		18,50	75,8	
4,50	88,2		19,00	74,6	
4,75	87,8		19,50	70,4	
5,00	87,8		20,00	68,3	
5,50	85,6		20,50	71,5	
6,00	83,8		21,00	72,2	
6,50	82,7		21,50	70,4	
7,00	82,6	Endausschlag 100 dB	22,00	67,3	
7,50	82,0		22,50	69,4	
8,00	80,7		23,00	71,0	
8,50	79,7	Mähdrescher parkt in Nähe	23,50	70,1	
9,00	79,1		24,00	64,4	
9,50	79,9		24,50	56,9	
10,00	80,3		25,00	66,5	

### Messstrahl 2: in Richtung Süd für 5,5 m Höhe – 40 Hz Terz

Messabstand in m	Messwert $L_{40\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerkungen	Messabstand in m	Messwert $L_{40\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerkungen
0,25	106,5		10,50	72,2	
0,50	98,8		11,00	70,6	
0,75	96,5		11,50	69,4	
1,00	94,8		12,00	68,1	
1,25	92,5	Endausschlag 110 dB	12,50	67,6	
1,50	91,1		13,00	68,3	
1,75	89,8		13,50	68,4	
2,00	88,8		14,00	67,9	
2,25	87,5		14,50	67,8	
2,50	86,5		15,00	67,6	
2,75	85,8		15,50	67,0	
3,00	85,0		16,00	66,0	
3,25	84,6		16,50	65,7	
3,50	83,8		17,00	67,0	
3,75	83,1		17,50	69,4	
4,00	82,8		18,00	69,1	
4,25	82,3		18,50	69,8	
4,50	81,9		19,00	69,2	
4,75	81,2		19,50	68,7	
5,00	81,1		20,00	68,1	
5,50	79,9		20,50	64,2	
6,00	79,1		21,00	61,4	
6,50	78,1		21,50	62,8	
7,00	77,6	Endausschlag 100 dB	22,00	64,5	
7,50	76,9		22,50	66,6	
8,00	76,4		23,00	67,8	
8,50	75,1	Mähdrescher parkt in Nähe	23,50	68,0	
9,00	74,9		24,00	67,9	
9,50	74,4		24,50	67,5	
10,00	73,4		25,00	66,4	

### **Messstrahl 3: in Richtung Ostsüdost für 5,5 m Höhe – 80 Hz Terz**

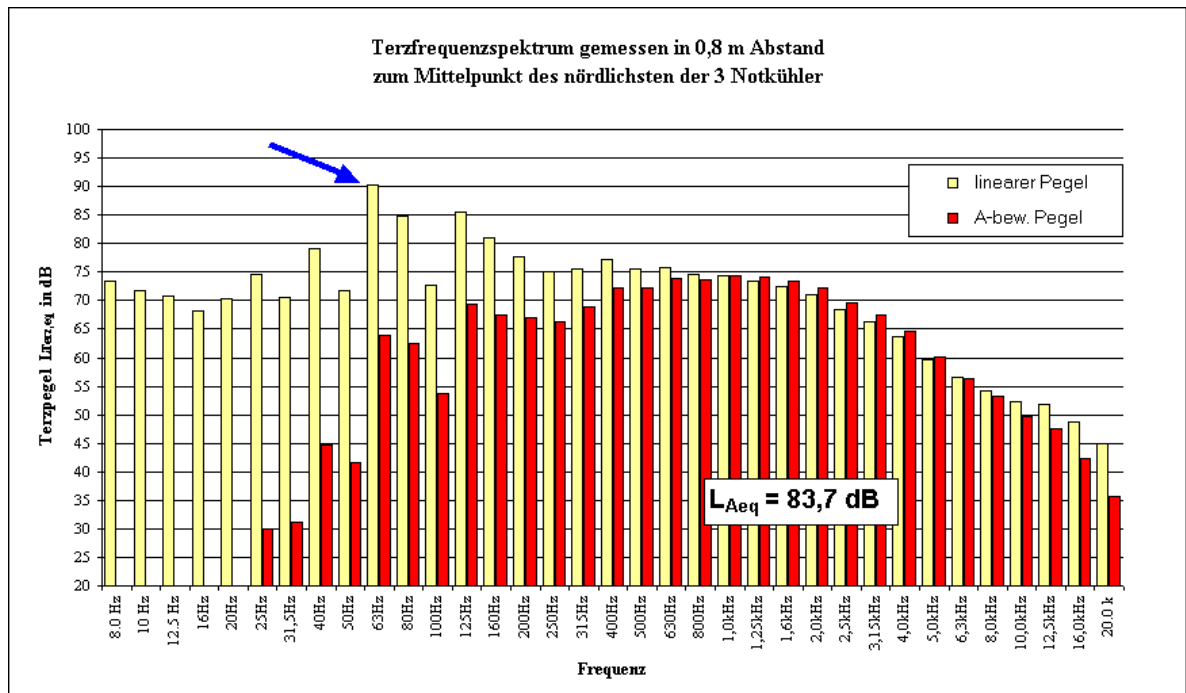
Messabstand in m	Messwert $L_{80\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerk- ungen	Messabstand in m	Messwert $L_{80\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerk- ungen
0,25	107,5		2,75	89,7	
0,50	103,4		3,00	89,7	
0,75	101,0		3,25	90,4	
1,00	99,9		3,50	91,0	
1,25	98,6		3,75	91,0	
1,50	97,5		4,00	91,0	Endausschlag 110
1,75	95,8		4,25	90,6	
2,00	93,9		4,50	90,3	
2,25	92,9		4,75	88,5	
2,50	90,5		5,00	86,6	

### **Messstrahl 3: in Richtung Ostsüdost für 5,5 m Höhe – 40 Hz Terz**

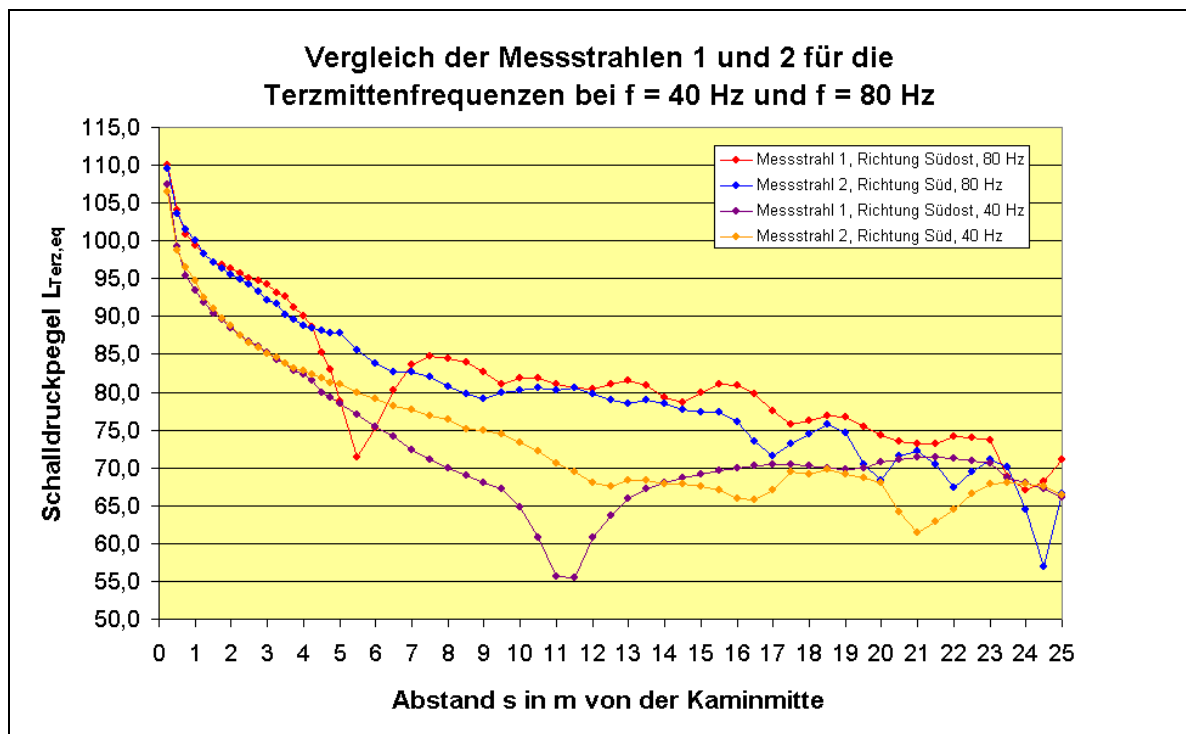
Messabstand in m	Messwert $L_{40\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerk- ungen	Messabstand in m	Messwert $L_{40\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerk- ungen
0,25	104,1		2,75	84,6	
0,50	97,8		3,00	83,0	
0,75	94,7		3,25	82,0	
1,00	93,2		3,50	81,2	
1,25	91,8		3,75	80,9	
1,50	90,8		4,00	80,4	Endausschlag 110
1,75	89,2		4,25	80,2	
2,00	87,8		4,50	80,1	
2,25	87,2		4,75	80,2	
2,50	85,4		5,00	80,1	



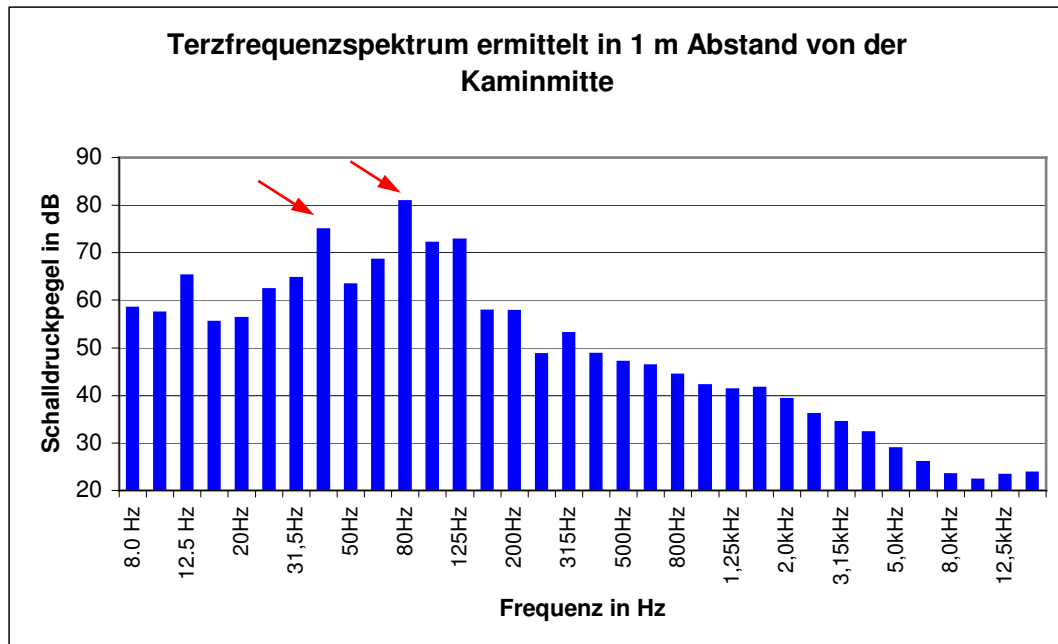
## Weitere Quellen tieffrequenter Schallabstrahlung



## Zusätzliche informative Darstellungen



## Anlage (8): Messergebnisse des BHKWs in Lichtenberg



## Messprotokoll

Ort / Messobjekt: BHKW in Lichtenberg

Datum: 31.07.2009

Messzeit: 10:30 bis 14:15

Bediener; verwendete Messtechnik:

T. Tröger, A. Förster: Nor 110 (2,1 m bzw. 8,1 m Höhe)

Messgrößen:  $L_{80\text{Hz,eq}}$ ;  $L_{40\text{Hz,eq}}$ ;  $L_{\text{Terz,eq}}$

Mittelungszeit je Messwert: 15 s

Meteorologische Bedingungen:

sonnig bis leicht bewölkt,

leichter Wind aus Richtung Nordost während der gesamten Messung

Bemerkungen:

Messgerät Nor110 wurde im Nahbereich auf 120 dB Endausschlag eingestellt

Motortyp: Caterpillar Typ 3406 (R6)

$d_{\text{Kamin}} = 20 \text{ cm}$

### Messstrahl 1: in Richtung Westnordwest für 2,1 m Höhe

Messabstand in m	Messwert $L_{80\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerk- ungen	Messabstand in m	Messwert $L_{80\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerk- ungen
0,25	95,0		7,00	68,7	
0,50	87,5		7,50	69,4	
0,75	84,8		8,00	68,9	
1,00	80,8		8,50	68,7	
1,25	79,4		9,00	68,9	
1,50	76,9		9,50	68,9	
1,75	75,8		10,00	68,8	
2,00	72,9		10,50	68,2	
2,25	69,2		11,00	68,1	
2,50	67,9		11,50	67,9	
2,75	66,5		12,00	67,3	
3,00	65,5		12,50	66,3	
3,25	65,5		13,00	64,6	
3,50	65,7		13,50	64,5	
3,75	66,6		14,00	65,0	
4,00	67,2		14,50	65,2	
4,25	69,1		15,00	65,5	
4,50	67,6		15,50	66,2	
4,75	67,7	Endausschlag 110 dB	16,00	66,4	
5,00	67,7		16,50	66,0	
5,50	67,3		17,00	64,2	
6,00	67,9		17,50	61,7	
6,50	68,8		18,00	62,1	

### **Messstrahl 2: in Richtung Ostsüdost für 8,1 m Höhe**

Messabstand in m	Messwert $L_{80\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerk- ungen	Messabstand in m	Messwert $L_{80\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerk- ungen
0,25	90,2		7,00	65,8	
0,50	85,6		7,50	65,0	
0,75	83,3		8,00	65,8	
1,00	81,7		8,50	65,9	
1,25	78,8		9,00	66,2	
1,50	76,6		9,50	66,7	
1,75	74,0		10,00	66,9	
2,00	70,1		10,50	66,9	
2,25	66,9		11,00	66,8	Endausschlag 110 dB
2,50	62,9		11,50	65,6	
2,75	69,1		12,00	63,9	
3,00	68,3		12,50	63,9	
3,25	69,2		13,00	62,8	
3,50	70,3		13,50	62,0	
3,75	69,8		14,00	60,7	
4,00	69,9		14,50	59,8	
4,25	70,0		15,00	58,9	
4,50	70,8		15,50	55,5	
4,75	69,8		16,00	52,5	
5,00	74,2		16,50	53,7	
5,50	69,2		17,00	57,0	
6,00	67,4		17,50	57,8	
6,50	66,0		18,00	56,3	

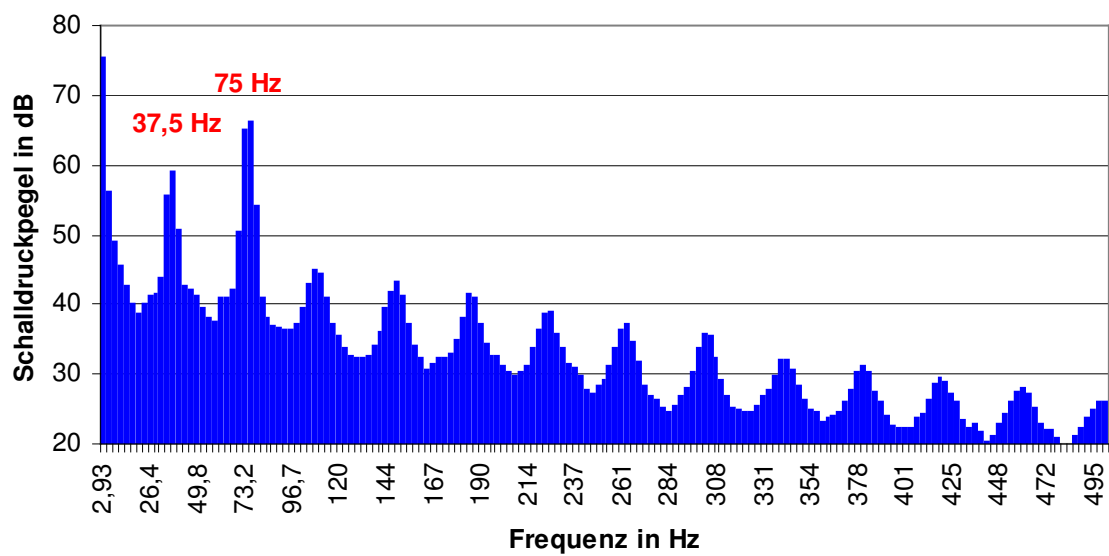
### **Messstrahl 3: in Richtung Südwest für 2,1 m Höhe**

Messabstand in m	Messwert $L_{80\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerk- ungen	Messabstand in m	Messwert $L_{80\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerk- ungen
0,25	90,8		2,75	67,6	
0,50	89,3		3,00	67,9	
0,75	85,8		3,25	68,2	
1,00	83,6		3,50	68,6	
1,25	83,1		3,75	69,7	
1,50	80,3		4,00	70,3	
1,75	78,8		4,25	69,8	
2,00	75,0		4,50	70,3	
2,25	72,4		4,75	69,7	
2,50	68,6		5,00	70,0	

## Anlage (9): Messergebnisse des BHKWs in Reinhardtsdorf



FFT-Analyse ermittelt in 1 m Abstand von der Kaminmitte



## Messprotokoll

Ort / Messobjekt: BHKW in Reinhardtsdorf

Datum: 06.08.2009

Messzeit: 11:15 bis 14:15

Bediener; verwendete Messtechnik:

T. Tröger: Nor 121

A. Förster, Herr Truska: Nor 110

Messgrößen:  $L_{80\text{Hz,eq}}$ ;  $L_{40\text{Hz,eq}}$ ;  $L_{\text{Terz,eq}}$

Mittelungszeit je Messwert: 15 s

Meteorologische Bedingungen:

leicht bewölkt,

leichter Wind aus Richtung Südost während der gesamten Messung

Bemerkungen:

Messgerät Nor121 und Nor 110 wurde im Nahbereich auf 120 dB Endausschlag eingestellt

Motortyp: MAN E 2842 LE 312 (V12)

$d_{\text{Kamin}} = 20 \text{ cm}$

**Messstrahl 1: in Richtung Ostsüdost (entlang des Dachfirstes) für 3,5 m  
Höhe – 80 Hz Terz -**

Messabstand in m	Messwert L <sub>80Hz,eq</sub> in dB	Bemerk- ungen	Messabstand in m	Messwert L <sub>80Hz,eq</sub> in dB	Bemerk- ungen
0,25	-		10,50	66,2	
0,50	85,9		11,00	64,7	
0,75	85,1		11,50	63,6	
1,00	84,4		12,00	62,9	
1,25	83,1		12,50	60,4	
1,50	82,8		13,00	55,5	
1,75	81,7		13,50	57,6	
2,00	81,3		14,00	59,8	
2,25	80,1		14,50	60,5	
2,50	79,3		15,00	60,5	Endausschlag 100 dB
2,75	79,6		15,50	57,9	
3,00	79,4		16,00	56,1	
3,25	79,1		16,50	56,2	
3,50	78,6		17,00	57,6	
3,75	78,4		17,50	57,8	
4,00	78,1	Endausschlag 110 dB	18,00	58,4	
4,25	78,0		18,50	60,2	
4,50	77,6		19,00	60,9	
4,75	76,5		19,50	60,1	
5,00	76,2		20,00	59,3	
5,50	75,1		20,50	58,5	
6,00	74,3		21,00	60,3	
6,50	73,4		21,50	60,2	
7,00	72,4		22,00	60,2	
7,50	71,6		22,50	61,6	
8,00	68,9		23,00	62,1	
8,50	66,7		23,50	62,2	
9,00	67,1		24,00	61,7	
9,50	66,8		24,50	61,2	
10,00	67,0		25,00	60,9	



**Messstrahl 1: in Richtung Ostsüdost (entlang des Dachfirstes) für 3,5 m  
Höhe – 40 Hz Terz -**

Messabstand in m	Messwert L <sub>40Hz,eq</sub> in dB	Bemerk- ungen	Messabstand in m	Messwert L <sub>40Hz,eq</sub> in dB	Bemerk- ungen
0,25	-		10,50	63,1	
0,50	78,7		11,00	62,9	
0,75	77,9		11,50	62,7	
1,00	76,5		12,00	62,4	
1,25	75,4		12,50	63,1	
1,50	74,9		13,00	62,7	
1,75	73,2		13,50	61,7	
2,00	73,1		14,00	61,9	
2,25	70,3		14,50	60,5	
2,50	69,6		15,00	60,2	Endausschlag 100 dB
2,75	69,7		15,50	60,8	
3,00	67,9		16,00	60,8	
3,25	67,5		16,50	61,3	
3,50	66,7		17,00	61,8	
3,75	66,1		17,50	61,3	
4,00	65,5	Endausschlag 110 dB	18,00	59,7	
4,25	65,1		18,50	59,0	
4,50	64,5		19,00	58,7	
4,75	64,8		19,50	59,0	
5,00	64,5		20,00	58,5	
5,50	65,2		20,50	58,6	
6,00	66,1		21,00	59,2	
6,50	65,0		21,50	59,0	
7,00	65,1		22,00	59,6	
7,50	64,5		22,50	59,5	
8,00	64,4		23,00	58,0	
8,50	63,1		23,50	58,0	
9,00	62,1		24,00	57,4	
9,50	62,4		24,50	56,9	
10,00	62,0		25,00	56,1	

### Messstrahl 2: in Richtung Westnordwest für 10,1 m Höhe – 80 Hz Terz

Messabstand in m	Messwert $L_{80\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerk- ungen	Messabstand in m	Messwert $L_{80\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerk- ungen
0,25	97,3		8,00	73,5	
0,50	89,5		8,50	72,8	
0,75	87,8		9,00	71,7	Endausschlag 110 dB
1,00	85,9		9,50	71,1	
1,25	84,6		10,00	70,2	
1,50	83,6		10,50	68,4	
1,75	83,3		11,00	65,8	
2,00	82,6		11,50	62,8	
2,25	81,6		12,00	61,1	
2,50	80,9		12,50	61,8	
2,75	79,6		13,00	62,2	
3,00	78,8		13,50	63,6	
3,25	77,5		14,00	64,0	
3,50	75,6		14,50	64,9	
3,75	74,4		15,00	64,7	
4,00	72,2		15,50	65,3	
4,25	70,6		16,00	65,8	
4,50	69,0		16,50	65,8	
4,75	68,1		17,00	66,3	
5,00	68,4		17,50	66,7	
5,50	69,0		18,00	66,7	
6,00	71,1		18,50	66,6	
6,50	72,4		19,00	66,2	
7,00	73,4		19,50	65,9	
7,50	73,6		20,00	64,5	

### Messstrahl 2: in Richtung Westnordwest für 10,1 m Höhe – 40 Hz Terz

Messabstand in m	Messwert $L_{40\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerkungen	Messabstand in m	Messwert $L_{40\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerkungen
0,25	89,6		8,00	60,4	
0,50	81,9		8,50	59,1	
0,75	80,2		9,00	59,0	Endausschlag 110 dB
1,00	78,1		9,50	59,4	
1,25	76,7		10,00	58,4	
1,50	75,7		10,50	59,7	
1,75	75,1		11,00	59,7	
2,00	74,2		11,50	60,0	
2,25	73,7		12,00	60,2	
2,50	73,0		12,50	60,6	
2,75	72,1		13,00	61,0	
3,00	70,7		13,50	60,7	
3,25	70,6		14,00	60,8	
3,50	69,8		14,50	60,5	
3,75	69,0		15,00	60,6	
4,00	68,6		15,50	59,9	
4,25	68,1		16,00	59,7	
4,50	67,7		16,50	60,4	
4,75	66,7		17,00	59,6	
5,00	66,7		17,50	59,6	
5,50	65,2		18,00	60,0	
6,00	64,0		18,50	59,9	
6,50	62,6		19,00	59,7	
7,00	61,9		19,50	59,9	
7,50	60,7		20,00	59,3	

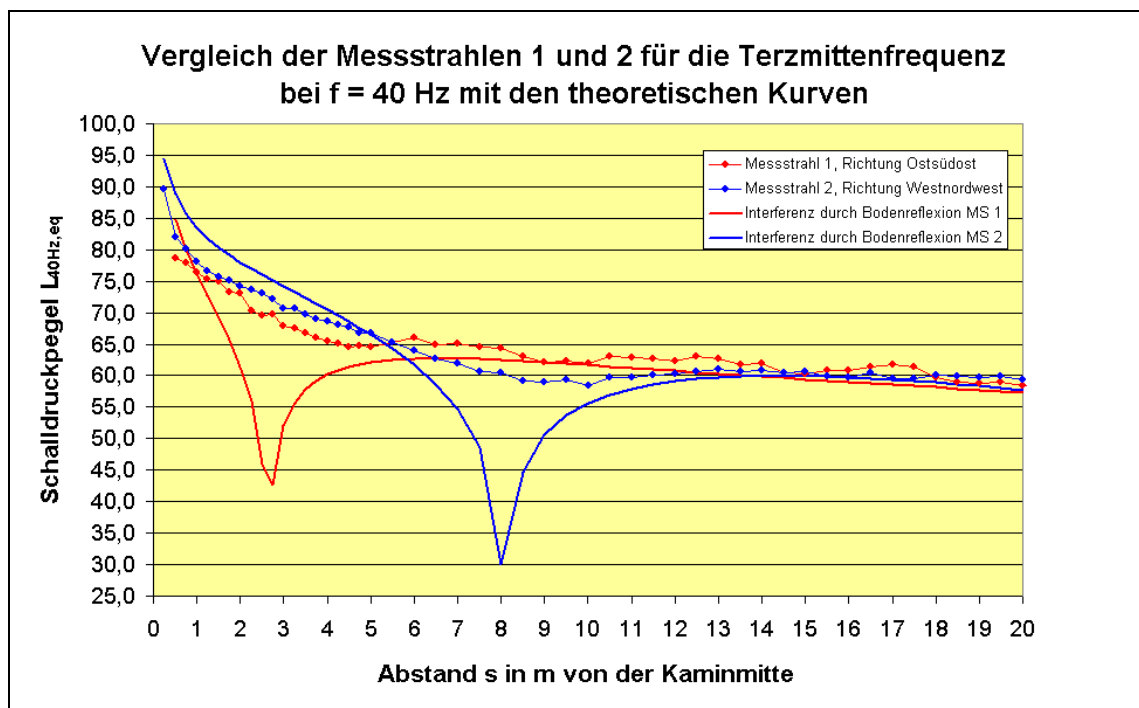
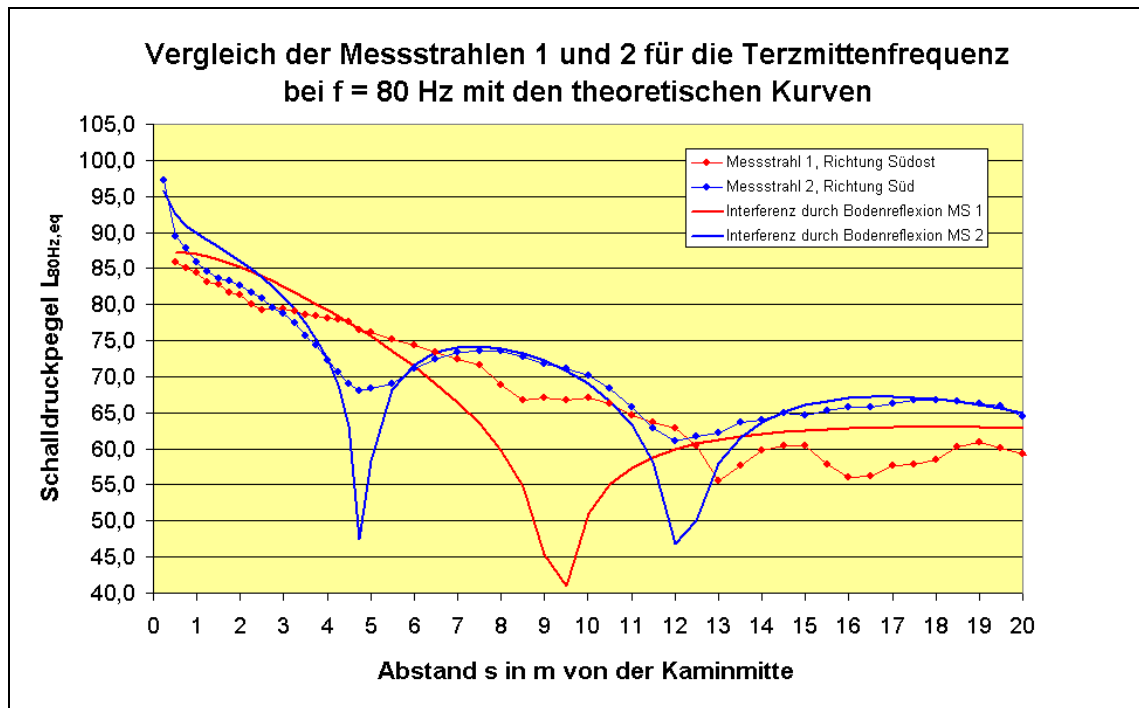
### **Messstrahl 3: in Richtung Südsüdwest für 10,1 m Höhe – 80 Hz Terz**

Messabstand in m	Messwert $L_{80\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerk- ungen	Messabstand in m	Messwert $L_{80\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerk- ungen
0,25	96,1		2,75	79,2	
0,50	93,6		3,00	78,2	
0,75	91,0		3,25	78,0	
1,00	87,6		3,50	77,3	
1,25	85,7		3,75	76,9	
1,50	84,0		4,00	76,1	
1,75	82,1		4,25	75,8	
2,00	82,0		4,50	74,4	
2,25	81,0	Endausschlag 110 dB	4,75	73,9	
2,50	80,5		5,00	73,4	

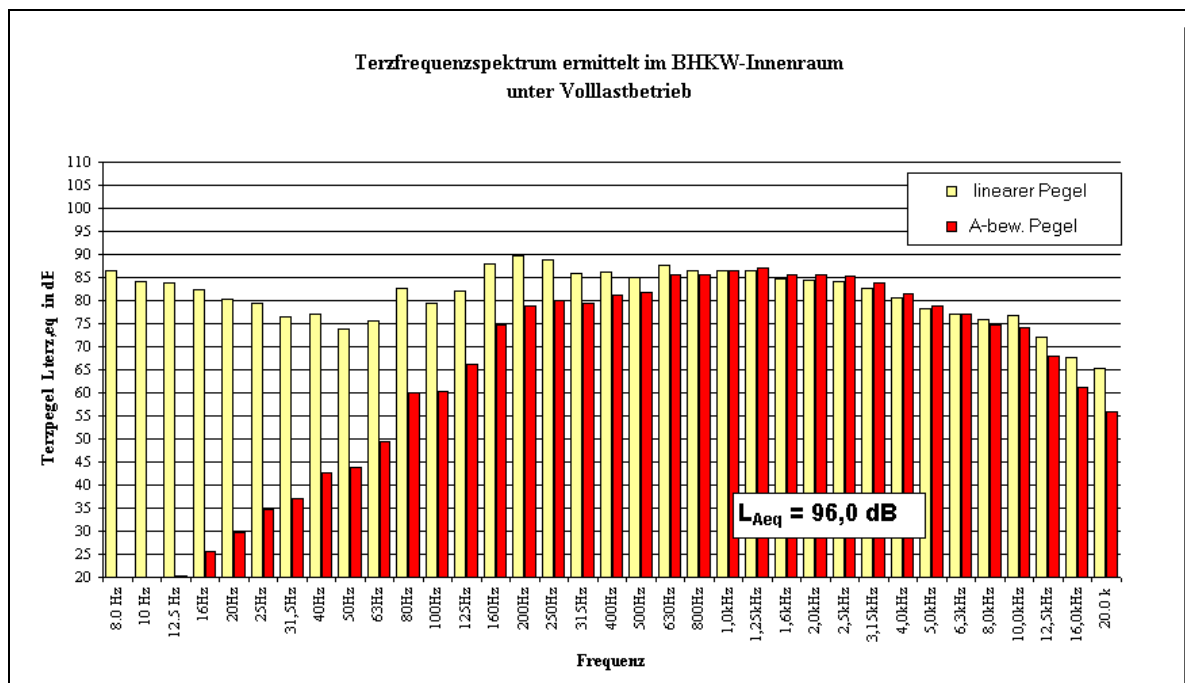
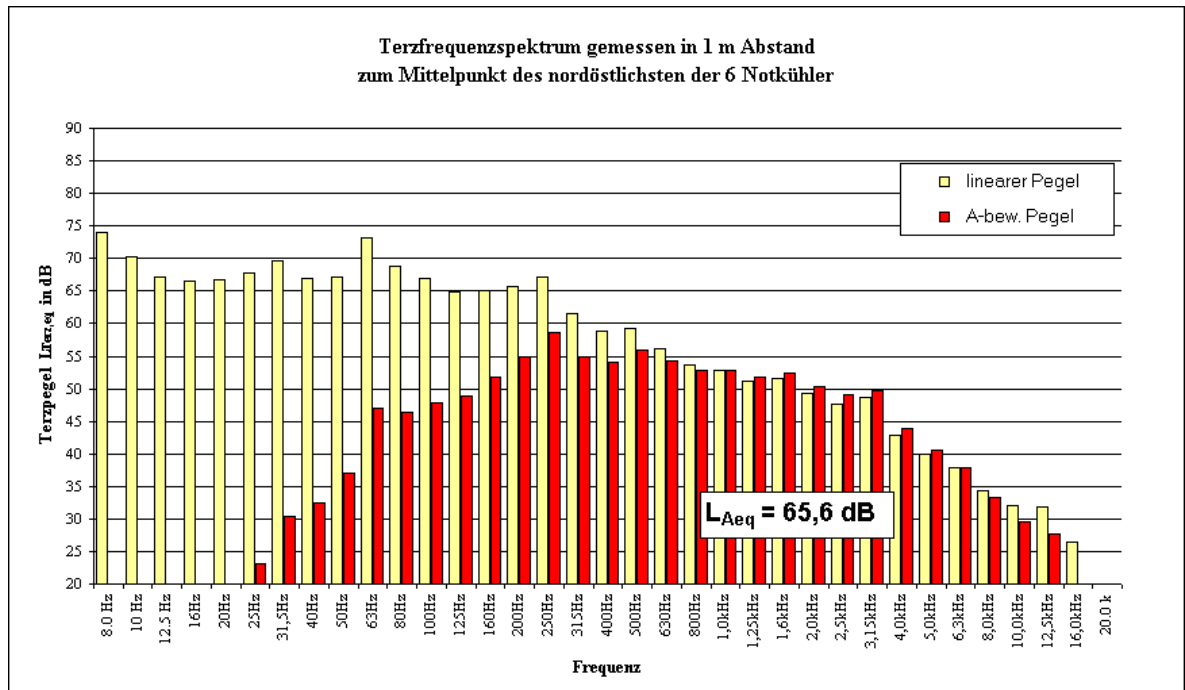
### **Messstrahl 3: in Richtung Südsüdwest für 10,1 m Höhe – 40 Hz Terz**

Messabstand in m	Messwert $L_{40\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerk- ungen	Messabstand in m	Messwert $L_{40\text{Hz,eq}}$ in dB	Bemerk- ungen
0,25	88,1		2,75	71,8	
0,50	86,0		3,00	70,5	
0,75	83,4		3,25	71,1	
1,00	79,8		3,50	69,7	
1,25	78,1		3,75	69,6	
1,50	76,3		4,00	68,5	
1,75	74,4		4,25	68,0	
2,00	74,5		4,50	67,1	
2,25	73,2	Endausschlag 110 dB	4,75	67,1	
2,50	72,4		5,00	66,6	

## Zusätzliche informative Darstellungen



## Weitere Quellen tieffrequenter Schallabstrahlung



## Anlage (10): Messergebnisse Schallpegeldifferenz außen- innen für tiefe Frequenzen ( $f < 100$ Hz)



Tabelle: Messwerte an den unterschiedlichen Messpunkten und **geringsten**  
**Pegelunterschieden**

Frequenz in Hz Messort	100	87,5	75	62,5	50	37,5
0,5 m vor geöffnetem Fenster	72,4	79,0	85,4	84,6	80,9	70,7
MP 1	52,4	54,4	63,6	54,8	64,0	60,3
MP 2	53,4	48,5	51,7	47,2	58,7	56,0
MP 3	50,4	47,6	51,7	47,3	38,8	61,1
MP 4	43,5	37,6	49,0	48,7	53,5	59,2

**Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Chemnitz, den 09.09.2009

Thomas Tröger